

Levas

Este material fue confeccionado con la inestimable colaboración de alumnos de la cátedra en sucesivos años

Objetivo :

Llegar a comprender el funcionamiento de una leva determinando las distintas variables que la caracterizan, tales como, perfiles, excentricidad, periodos de subida, bajada, detenimiento. Para así poder trazar el desarrollo de su perfil, utilizando el programa DYNACAM.

Introducción

Una leva es un elemento mecánico que sirve para impulsar a otro elemento llamado seguidor, para que desarrolle un movimiento especificado, por contacto directo.

Los sistemas de leva y seguidor se utilizan frecuentemente en muchas clases de máquinas. En comparación con los eslabonamientos son más fáciles de diseñar para desempeñar una función específica de salida pero resultan más difíciles y costosos de fabricar.

Esta diferencia conceptual hace que una leva-seguidor sea un flexible y útil generador de funciones. Es posible especificar cualquier función de salida que se desee, y muy probablemente crear una superficie curva en la leva que genere esa función en el movimiento del seguidor.

El árbol de levas, aunque permite la transformación del movimiento, tiene el enorme defecto de impulsar la fuerza en un solo sentido. Pero posee un triunfo: jugando sobre el lugar y el número de levas, se le puede hacer ejecutar operaciones según un orden extremadamente preciso, se puede programar el movimiento de las palancas que acciona. También había muchas levas en los autómatas, antepasados de los computadores.

A continuación veremos un resumen sobre las distintas formas de clasificar las levas y los elementos, que en conjunto con estas realizan la transformación del movimiento.

Clasificación

Las levas se pueden clasificar según sus usos, formas, tipos de movimientos, etc.

Tipo de leva

La dirección del movimiento del seguidor respecto del eje de rotación de la leva determina esta clasificación: radial, axial, tridimensional, de traslación o de cuña.

Tipo de cierre de junta

Determina el medio por el cual se produce el cierre. De forma (no necesita esfuerzos externos): dos superficies de contacto, de fuerza (requiere de esfuerzos externos): generalmente, un resorte.

Tipo de seguidor

Elemento que hace contacto con la leva
rodillo, hongo, cara plana o puntual.

Movimiento del seguidor

Se determina por su uso y por el tipo de movimiento que se desea a la salida: traslación o rotación.

Tipo de restricciones del movimiento

De posición extrema crítica
Movimiento de trayectoria crítica.

Tipo de programa de movimiento

Subida- bajada
Subida-bajada-detenimiento
Subida-detenimiento-bajada-detenimiento.

Terminología de los mecanismos de Leva

Los sistemas de leva y seguidor pueden clasificarse de varios modos:

Por el tipo de leva:

- Radial (fig 1 y 2)
- Axial (fig 3)
- Tridimensional
- De traslación (fig 4)
- De yugo (Fig. 5)

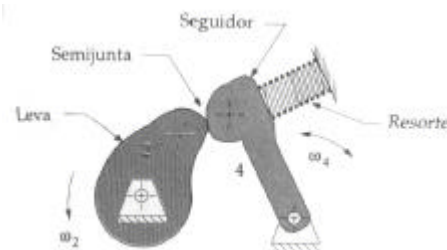


Fig. 1

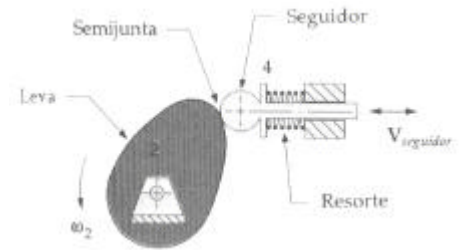


Fig. 2

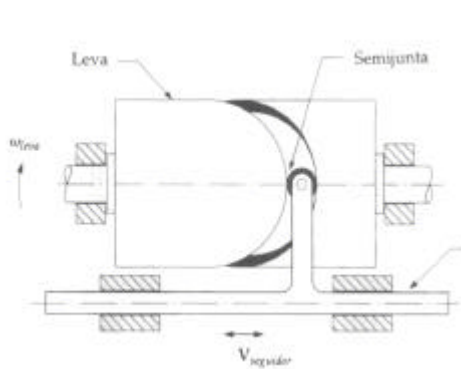


Fig. 3

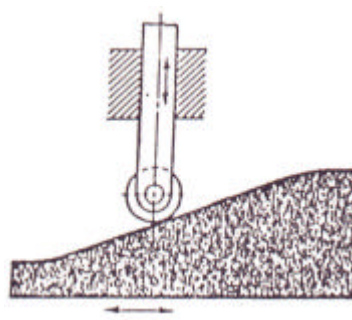


Fig. 4

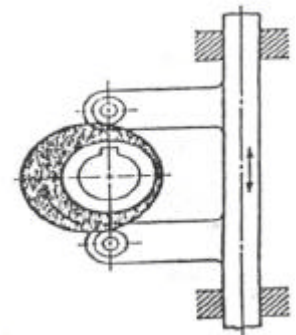


Fig. 5

La dirección del movimiento del seguidor respecto al eje de rotación de la leva determina si esta ha de ser radial o axial.

Cuando el seguidor se mueve paralelo al eje de rotación de la leva, se dice que esta es de tipo axial. Dentro de este tipo de levas encontramos a las levas de cara (tienen cierre de fuerza) y a las levas cilíndricas, cuya ranura proporciona el cierre de forma.

Una leva tridimensional o levoide es una combinación de una leva radial y una axial.

Por el tipo de cierre de junta:

- De fuerza (Fig. 6)
- De forma (Fig. 7)

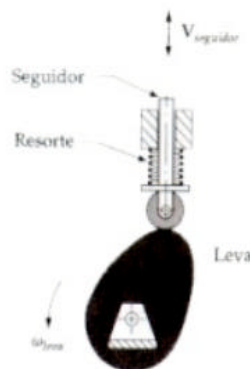


Fig. 6

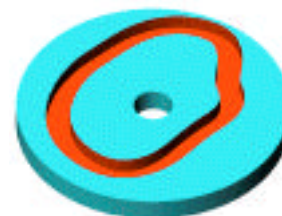


Fig. 7

El cierre de fuerza requiere la aplicación de una fuerza externa a la junta, a fin de mantener la leva y el seguidor físicamente en contacto. Tal fuerza suele ser proporcionada por un resorte. Este tipo de juntas solo puede empujar y no ejercer tracción.

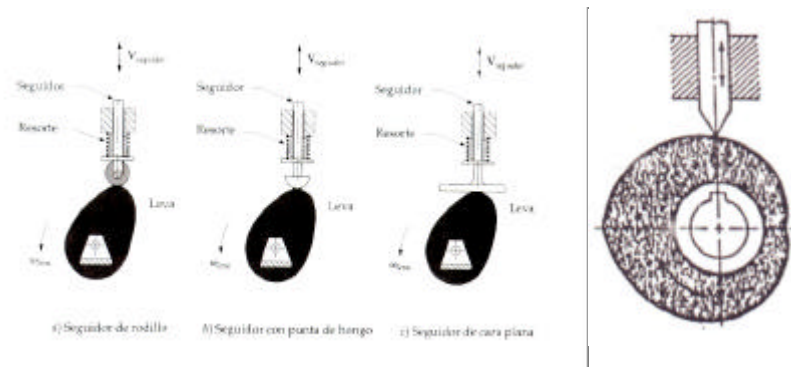
El cierre de forma cierra la junta sin necesidad de ninguna fuerza externa. Hay dos superficies de leva, una a cada lado del seguidor, que toman contacto con el seguidor cada una a su turno cuando la leva gira.

Como ejemplo de estas levas podemos citar a las de ranura o canaleta y a las levas conjugadas o adjuntas.

Por el tipo de seguidor:

El seguidor es el elemento que hace contacto con la leva y se llama también Contra leva, puede ser:

De rodillo
De hongo
De cara plana
Puntual



El seguidor de rodillo tiene la ventaja de tener menor fricción con la superficie de la leva debido al rodamiento. Las levas de ranura requieren este tipo de seguidores.

Los seguidores de hongo y puntuales suelen estar diseñados y fabricados para aplicaciones especiales.

El de cara plana forma un conjunto más compacto con la leva y es menos costoso que el anterior. Esta clase de seguidores son usados en los motores de automóviles.

Por el tipo de movimiento del seguidor:

De rotación (Fig. 1)
De traslación (Fig. 2)

La elección entre estas dos formas suele ser decidida por el tipo de movimiento deseado en la salida.

Por el tipo de restricciones al movimiento:

De posición extrema crítica
Movimiento de trayectoria crítica

La restricción al movimiento de posición extrema crítica (CEP) se refiere al caso en que las especificaciones de diseño definen las posiciones inicial y final del seguidor, pero no presentan restricción alguna a la trayectoria que unirá las mencionadas posiciones. Este caso es el más conveniente para el proyectista ya que tendrá amplia libertad para seleccionar las trayectorias entre los puntos extremos.

La restricción de movimiento de trayectoria crítica (CPM) es un problema más restringido. El proyectista debe generar con la leva una función de trayectoria ya establecida. En general sólo puede ser posible crear una aproximación de la función especificada conservando un comportamiento dinámico adecuado.

Por el tipo de programa de movimiento:

Subida – Bajada
Subida – Bajada – Detenimiento

Subida – Detenimiento – Bajada – Detenimiento

Los casos enunciados corresponden al tipo de restricción de movimiento, y definen cuantas detenciones existen en el ciclo de leva.

Se entiende por detenimiento a un movimiento nulo de salida durante un lapso de movimiento de entrada, es decir mantener inmóvil el seguidor mientras la leva rota en un intervalo de tiempo dado.

Diseño de levas

El diseño de la leva, como todos sabemos, dependerá de la posterior aplicación de la misma. Deben conocerse una serie de parámetros para comenzar con el diseño del perfil.

Necesitamos saber el ciclo de movimiento, es decir: cuanto subirá, como subirá, cuantas detenciones tendrá, etc. Por ejemplo, puede requerirse un seguidor que permanezca detenido durante los primeros 90° de giro a una altura conocida. Luego se desea que aquél suba hasta una altura h en los siguientes 90° y permanezca detenido durante otro período similar. Finalmente el seguidor debe bajar hasta la posición de partida en el segmento restante.

Con estos datos en mente, se deben armar los diagramas de leva (S, V, A, J).

Los Diagramas S V A J

La primera tarea para el diseñador de levas consiste en seleccionar las funciones matemáticas a utilizar para definir el movimiento del seguidor. El proyectista grafica en un plano cartesiano la función matemática que caracterizará el desplazamiento (S) del seguidor. Este proceso equivale a 'desenrollar' el perfil de la leva y luego graficarlo en dependencia del ángulo (θ) de rotación de la leva. Las tres derivadas siguientes de dicha expresión representarán la velocidad (V), la aceleración (A) y la rapidez de aceleración o 'sacudida' (J) respectivamente.

A modo de ejemplo el proyectista podría seleccionar el siguiente diagrama (fig 8)

Este diseño resulta deficiente pues las derivadas de orden superior se hacen infinitas, es decir, que el seguidor se verá sometido a aceleraciones y sacudones excesivamente grandes. El problema aquí ha sido no tener en cuenta la ley de diseños de levas.

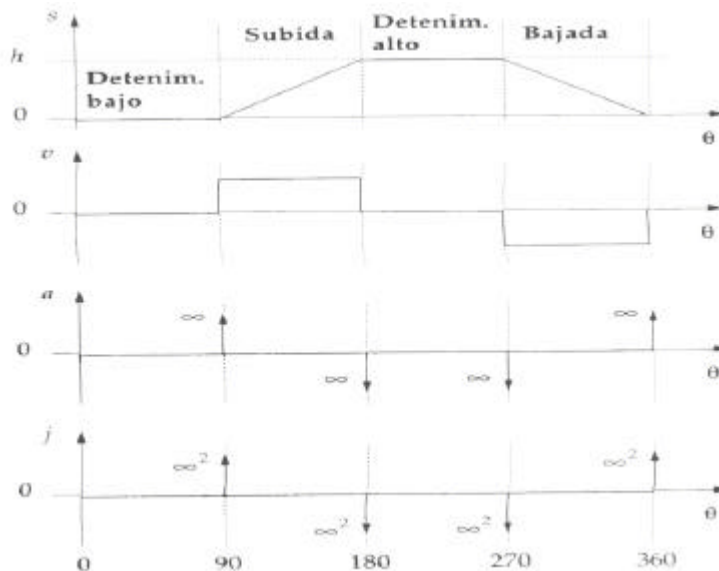


Fig 8

Ley fundamental del diseño de levas

Esta ley debe ser tenida en cuenta por todo aquel proyectista que anhela diseñar una leva de funcionamiento eficiente, estableciendo para operaciones a velocidades elevadas o bajas, las siguientes restricciones:

La función de leva (S) debe ser continua a través de la primera y segunda derivada del desplazamiento en todo el intervalo (360°). Inmediatamente surge como conclusión que la función rapidez de aceleración (J) debe ser finita en todo el intervalo.

Cada vez que derivemos una función polinomial bajamos en un grado su exponente, por lo tanto si no se selecciona un grado suficientemente alto, después de un número sucesivo de derivaciones el polinomio se degrada obteniendo una función constante, que es imposible de ensamblar con la del segmento adyacente. Por lo tanto la derivada siguiente se indeterminará en ese punto de unión.

Con el fin de obedecer la ley fundamental del diseño de levas, uno debe empezar con un polinomio de tercer grado, como mínimo, en la función S. Esto garantiza que la función J sea finita, aunque no necesariamente continua.

Se debe tener presente que las funciones armónicas son infinitamente derivables en todo punto, por lo tanto, parecen a primera vista las más apropiadas para nuestro caso.

El método más conveniente es el de comenzar considerando las derivadas superiores, en especial la aceleración, y en menor grado su derivada (J). En algunos casos, específicamente cuando la masa del seguidor es grande, o cuando hay una restricción de velocidad, esa función debe ser cuidadosamente diseñada.

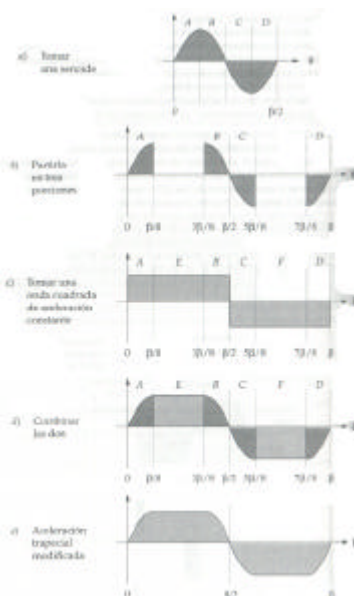
El procedimiento ahora consistirá en obtener las funciones S y V a partir de la integración de la aceleración, obteniendo los valores de las constantes de integración sucesivas a partir de las condiciones de frontera establecidas para el problema.

Un ejemplo de condición de frontera en nuestro problema sería $V = 0$ cuando $\theta = 0$.

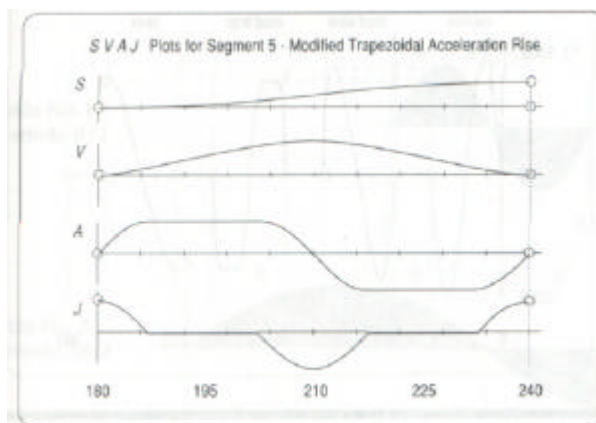
Indudablemente un diseñador experto obtendrá varias funciones que cumplan las condiciones de funcionamiento de la leva solicitada. Para seleccionar la más conveniente deberá tener en cuenta algunas consideraciones dinámicas.

Como la fuerza dinámica es proporcional a la aceleración y por lo general se desea minimizar dichas fuerzas, entonces necesitamos minimizar la aceleración. También sabemos que la energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad, y conviene reducirla cuando hay trenes de seguidor de gran masa, entonces se debe tener en cuenta la magnitud de la velocidad.

Son de gran utilidad las funciones combinadas, pues nos permiten resaltar las ventajas de unas y otras. Por ejemplo, existe una función denominada onda trapecial modificada, que resulta de combinar una senoidal con una constante.



Esta onda es usada como una función aceleración homónima y genera, para un segmento, un diagrama de leva como el que continúa:



Tiene la ventaja de una aceleración pico relativamente baja y transiciones relativamente alisadas en los extremos del intervalo.

También existen otras funciones combinadas como la senoidal modificada que resulta de la combinación apropiada de dos funciones seno de distintas frecuencias.

Hay una clase de funciones muy versátiles que pueden ser utilizadas en el diseño de levas, y que son las polinomiales. Su forma general es:

$$S = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot x^3 + C_4 \cdot x^4 + C_5 \cdot x^5 + \dots + C_{n-1} \cdot x^{n-1} + C_n \cdot x^n$$

Los coeficiente C_n son las incógnitas por determinar en el desarrollo de la ecuación polinomial particular que se adapte a las especificaciones de diseño.

Para obtenerlos se procede de la siguiente manera:

Se deciden cuantas condiciones de frontera se desean especificar en los diagramas de levas.

El número de condiciones de frontera determina el grado del polinomio a utilizar. Si existen k condiciones de frontera el polinomio será de grado $k - 1$.

Como cada condición de frontera es una ecuación independiente, nos quedará un sistema lineal de k ecuaciones con k incógnitas.

Movimiento de trayectoria crítica

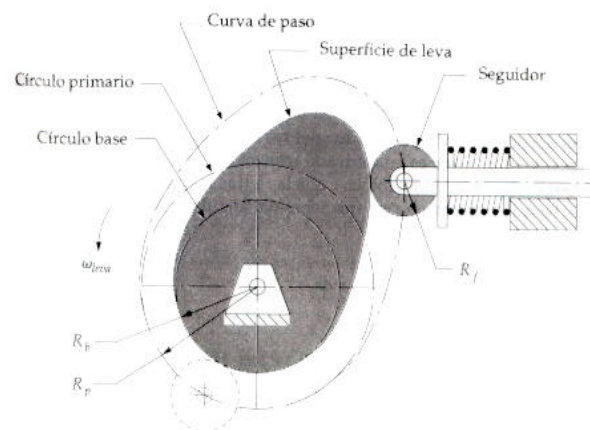
La aplicación más común de las especificaciones del movimiento de trayectoria crítica, en maquinarias de producción, es la de un movimiento a velocidad constante.

Dimensionado de la leva, ángulo de presión, radio de curvatura.

Una vez que han sido definidas las funciones S V A J, el siguiente paso es dimensionar la leva. Hay dos factores principales que afectan su tamaño, el ángulo de presión y el radio de curvatura. Ambos implican el radio del círculo base en la leva R_b cuando se usan seguidores de cara plana, o bien el radio del círculo primario R_p cuando se usan seguidores de rodillo o curvos.

Los centros de los círculos base y primarios se hallan en el centro de rotación de la leva. El círculo base se define como la menor circunferencia que puede trazarse tangente a la superficie física de la leva.

El círculo primario sólo es aplicable a levas con seguidores de rodillos o de hongo, y se mide hasta el centro del seguidor. El círculo primario se define como la menor circunferencia que puede trazarse tangente al lugar geométrico de la línea central del seguidor. El lugar geométrico de dicha línea central del seguidor se llama curva de paso.

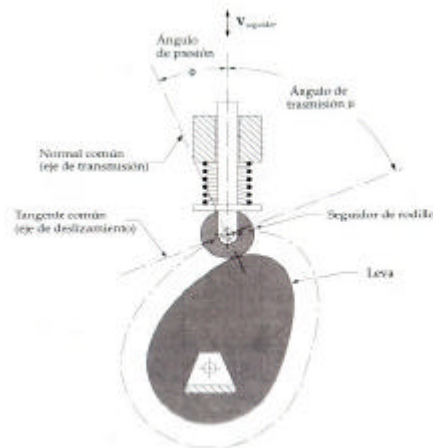


Para la manufactura las levas con seguidores de rodillo y cabeza de hongo están definidas respecto a la curva de paso, en cambio, las de seguidor de cara plana lo hacen respecto a su superficie material, ya que no hay curva de paso.

El proceso de crear la leva física a partir del diagrama S, puede visualizarse conceptualmente al imaginar que tal diagrama se enrosca alrededor del círculo primario, determinando así el perfil deseado. En este caso el eje 'x' representaría el perímetro del círculo primario. Finalmente el radio de este círculo se selecciona como parámetro de diseño.

Angulo de presión – Seguidores de rodillo.

Angulo de Presión - El ángulo de presión ϕ es el ángulo entre la dirección de movimiento (o de la velocidad) del seguidor, y la dirección del eje de transmisión. Cuando $\phi=0$ toda la fuerza transmitida se aplica al movimiento del seguidor, y ninguna parte a la velocidad de deslizamiento. Cuando $\phi=90$ no habrá movimiento del seguidor. En la práctica conviene que el ángulo de presión esté entre 0° y unos 30° en el caso de seguidores traslatorios, a fin de evitar una carga lateral excesiva sobre el seguidor deslizante. Si el seguidor oscila sobre un trazo pivotado, un ángulo de presión hasta unos 35° es aceptable. Valores de ϕ mayores aumentarán el deslizamiento del seguidor o la fricción en el pivote, hasta niveles indeseables, y pueden tender a trabar un seguidor traslatorio en sus guías.



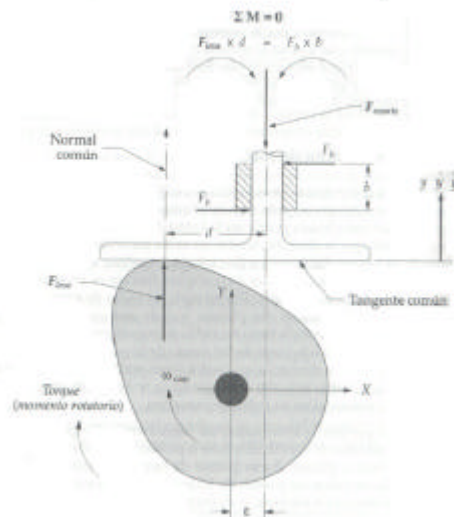
Excentricidad - Hay una excentricidad ϵ definida como la distancia perpendicular entre el eje de movimiento y el centro de la leva. La excentricidad puede ser nula, que corresponde a un seguidor alineado.

Aplicación de la excentricidad - Si una leva adecuadamente pequeña no puede obtenerse con un ángulo de presión aceptable, entonces se introduce la excentricidad para cambiarlo. Tenemos algunas limitaciones, por ejemplo un valor positivo de excentricidad hará disminuir el ángulo de presión en la subida, pero lo aumentará en la bajada. La excentricidad negativa hace lo contrario (en la leva con cierre de forma no interesa porque el seguidor no es empujado en una u otra dirección).

El valor mayor de agregar excentricidad a un seguidor se tiene en los casos en que el programa de la leva es asimétrico, y hay diferencias significativas entre los ángulos de presión máximos del ascenso y el descenso. Equilibrando los ángulos de presión obtendremos una leva más suave y regular.

Si los ajustes a R_p o a ϵ no producen ángulos de presión aceptables, el único recurso es regresar a una etapa anterior del proceso de diseño y replantear el problema.

Momento de volteo – Seguidor de cara plana



En la figura se muestra un seguidor de cara plana traslatorio que funciona en contacto con una leva radial. El ángulo de presión es cero para todas las posiciones de la leva y el seguidor. El punto de contacto se mueve a la izquierda y a la derecha, el punto de aplicación de la fuerza entre la leva y el seguidor se mueve con él. Hay un momento de volteo sobre el seguidor asociado a esta fuerza descentrada. Convendría mantener la leva lo más pequeña posible, con el fin de minimizar el brazo de momento de la fuerza. La excentricidad afectará el valor medio de tal momento.

Radio de curvatura – Seguidor de cara plana

Un radio de curvatura(ρ) negativo en la leva no puede corresponder a un seguidor de cara plana, obviamente no funcionaría bien con una leva cóncava.

Círculo base - Como ρ no puede ser negativo en el caso de un seguidor de cara plana, puede formularse una relación a partir de: $\rho = R_b + s + A$ (que define el radio de curvatura en función del círculo base). El único factor que puede ser negativo es la aceleración A . El peor caso para el rebaje ocurrirá cuando A se halle en su mayor valor negativo A_{\min} . Entonces podemos definir el radio mínimo del círculo base como:

$$R_{b\min} > \rho_{\min} - S_{\min} - A_{\min} \quad (\text{El valor de } S \text{ corresponde al de } A_{\min}.)$$

Perfil o contorno de la leva - Para una leva con seguidor de cara plana, las coordenadas de la superficie real de una leva deben ser proporcionadas al operario de máquina-herramienta. Dos vectores ortogonales, r y q definen las coordenadas cartesianas del punto de contacto entre leva y seguidor con respecto a un sistema coordinado de eje rotatorio incrustado en la leva.

La excentricidad es un factor en el dimensionado cuando se emplea un seguidor de rodillo, por ese motivo no la encontramos en las ecuaciones.

La tarea de dimensionar una leva es un excelente ejemplo de la necesidad y el valor de aplicar la iteración en el diseño. El recalculado rápido de las ecuaciones relevantes hace posible llegar con rapidez y facilidad a una solución aceptable, mientras se ponderan los frecuentes requisitos conflictivos de restricciones de ángulo de presión y radio de curvatura. En una leva, las consideraciones de ángulo de presión o radio de curvatura dictarán el tamaño mínimo de la leva. Ambos factores deben ser verificados. La elección del tipo de seguidor, ya sea de rodillo o de cara plana, constituye una gran diferencia en la configuración de la leva. Los programas para levas que generan radios de curvatura negativos son inapropiados para el tipo de seguidor de cara plana, a menos que se usen círculos base muy grandes para obligar a ρ a ser positivo en todo lugar.

Consideraciones para la fabricación de levas

Una vez que el diseño de una leva ha terminado, debe manejarse un nuevo conjunto de consideraciones que implica la manufactura de la leva. Si su diseño no pudo fabricarse con éxito en metal, de modo que verdaderamente represente las funciones teóricas elegidas, no podrán materializarse sus acciones y su utilidad.

Las levas suelen hacerse a partir de materiales duros y fuertes, como los aceros de medio a alto carbono con templados o bien fundición gris.

Es necesaria una fresadora razonablemente precisa para producir una leva. Es preferible un centro de maquinado controlado por computadora.

Funcionamiento real de una leva comparado con el funcionamiento teórico

Las diferencias teóricas entre las aceleraciones pico de distintas funciones de levas sufrirán alteración por la presencia de 'ruido' vibratorio en las formas de onda de aceleración reales. Tal perturbación se deberá en parte a errores introducidos en el proceso de manufactura, como se describió antes, pero también habrá diferencias inherentes debidas al grado en que la función de aceleramiento (jerk) produce vibraciones en el tren leva-seguidor.

Tal efecto vibratorio resultará fuertemente influido por las características dinámicas estructurales del propio mecanismo del seguidor.

El diseñador de levas suele enfrentarse a muchas decisiones confusas, especialmente en una etapa temprana del proceso de diseño.

Elección del tipo de seguidor

Hay muchos casos, especialmente en el inicio de un diseño, en los que podría ser considerado como salida de una leva, un movimiento de traslación o uno de rotación. Un movimiento aproximadamente rectilíneo suele ser adecuado, y puede obtenerse a partir de un

seguidor de balancín de gran radio. El seguidor oscilante tiene una ventaja notable sobre el de traslación, cuando se emplea un seguidor de rodillo. Uno del tipo de traslación gira alrededor del eje respectivo, y puede necesitar un dispositivo guía antirrotatorio (como uno de cuña o clavija) que impida la desalineación del seguidor de rodillo respecto de la leva.

Recíprocamente, en el seguidor oscilante de rodillo se mantendrá en el mismo plano de la leva, sin ningún medio de guía, salvo el pivote. También la fuerza de fricción en tal pivote tiene comúnmente un brazo de momento pequeño, comparado con el de la fuerza que ejerce la leva sobre el seguidor. La fuerza de fricción que actúa en un seguidor de traslación tiene una relación geométrica de uno a uno respecto de la fuerza de la leva. Esto puede tener un mayor efecto parásito sobre el sistema.

Tipo de cierre

Salto del seguidor - La ventaja principal de un mecanismo de leva con cierre de forma es que no necesita resorte de retorno, y por tanto puede funcionar a mayores velocidades que uno con cierre de fuerza, en el que su resorte y el propio seguidor entrarán en resonancia a una cierta velocidad, y ocasionarán el salto del seguidor, potencialmente destructivo.

Choque transversal - Aunque la falta de resorte de retorno puede ser una ventaja, tiene una contraparte. En una leva con cierre de forma ocurrirá el choque transversal cada vez que la aceleración cambia de signo. Tal efecto proviene de la fuerza de impacto que actúa cuando el seguidor salta súbitamente de un lado de la canaleta al otro, cuando la fuerza dinámica cambia de sentido. No hay un resorte o medio flexible en tal sistema que absorba la inversión de la fuerza.

Leva radial o axial

La elección la dicta, en gran parte, la configuración global de la máquina para la cual se diseña la leva.

Elección del seguidor

El seguidor de rodillo es una elección más fácil desde el punto de vista del diseño, pues permite un radio de curvatura negativo en la leva (esto permite mas variedad en el programa de la leva).

Quizá los mayores usuarios de seguidores de cara plana son los fabricantes de automóviles. Sus cantidades son tan elevadas que permiten hacer cualquier diseño especial. Pueden elaborarse o adquirirse económicamente en gran número, y en ese caso, ser menos caros que un seguidor de rodillo. También con las levas para válvulas de motor de combustión, un seguidor de cara plana puede ahorrar espacio, en comparación con uno de rodillo. Sin embargo, algunos fabricantes ya utilizan seguidores de rodillo en motores de auto para reducir la fricción y mejorar el rendimiento (kilometraje por litro). En los motores Diesel se emplean desde hace mucho seguidores punteros de rodillo, como es el caso de los autos de carrera, que poseen motores de alto rendimiento.

Uso de las detenciones

La necesidad de un detenimiento o detención suele ser clara a partir de las especificaciones del problema. Si el seguidor debe permanecer estacionario durante algún tiempo, entonces se requiere un detenimiento. Algunos diseñadores de levas, tienden a insertar detenimientos en casos donde no se necesitan, especialmente, para la inmovilidad del seguidor, por la creencia errónea de que tal cosa es preferible a proporcionar un movimiento de subida-retorno cuando esto es lo que en realidad se necesita.

¿Rectificar o no?

La mayoría de las levas para maquinaria de producción son sólo fresadas, sin rectificadas. La mayor parte de las levas para válvulas de automóviles son rectificadas o esmeriladas. En pequeñas cantidades el rectificado duplica el costo de la pieza.

Las levas para automotores se elaboran en grandes cantidades, operan a muy alta velocidad, y se espera que duren largo tiempo con poco mantenimiento

Lubricación

Las levas necesitan grandes cantidades de lubricación. Las de automóviles están ahogadas en un flujo de aceite. En cambio las de maquinarias de ensamble que operan muy cerca del producto el aceite pueden contaminar la producción, y por esto trabajan en seco.

A menos que exista una buena razón para omitir la lubricación, esta debe existir en todo momento.

DINAMICA DE LAS LEVAS

La dinámica de las levas consiste en el estudio de los sistemas de leva y seguidor considerando las fuerzas y los torques desarrollados dinámicamente.

Supongamos que deseamos estudiar un sistema de leva seguidor con cierre de fuerza. Como ya sabemos, en este tipo de sistemas el seguidor necesita de la acción de un resorte para mantenerse en contacto permanente con la leva. Para simplificar la tarea se crea un esquema donde aparecen las magnitudes relevantes del sistema caracterizados por tres clases de elementos: la masa, la elasticidad y el amortiguamiento. La primera representa toda la masa que se mueve con el tren de seguidor, es decir, la suma de las masas del vástago del seguidor, del rodillo, pivote del rodillo y de cualquier otro elemento fijado al conjunto en movimiento.

El segundo elemento se representa mediante un resorte de constante elástica k , ésta es la total del sistema y es una combinación de la del resorte helicoidal más las constantes de todas las otras partes que son deformadas por fuerzas. Debemos tener en cuenta que el rodillo, su pivote y el seguidor están hechos de materiales elásticos.

Como tercer parámetro tenemos un amortiguador que representa el efecto de fricción total. Es el parámetro más difícil de determinar ya que corresponde a la suma de todos los efectos de fricción entre elementos móviles y estáticos.

Tratando al seguidor como un cuerpo aislado lo representamos como una masa de valor m antes mencionado y lo sometemos a tres fuerzas dinámicas diferentes, una debida a la interacción con el resorte, otra generada por el amortiguador, y la restante es la que le produce la leva.

El diseñador puede determinar con bastante precisión la constante elástica del resorte ya que su valor es semejante a la del resorte real, puesto que la de los demás elementos tienen una pequeña influencia.

Cuando se desee una fuerza residual en el seguidor se le agrega una precarga, aún cuando la leva esté en su desplazamiento más bajo. Esta precarga consiste en mantener comprimido el resorte a partir de su longitud libre a una altura necesaria de tal manera que resulte la fuerza deseada. Esto en general ayudará a mantener un buen contacto entre la leva y el seguidor durante todo el ciclo.

El valor de c (coeficiente de amortiguamiento) del amortiguador puede estimarse para cada sistema pero es una tarea demasiado compleja debido a las variables que intervienen. Mediante estudios realizados se determinó que, en general para los sistemas de leva-seguidor c es $0,06c_c$ donde c_c es la constante de amortiguamiento crítico.

El sistema es caracterizado matemáticamente por una ecuación diferencial de segundo grado función del tiempo:

$$F_c(t) = m \cdot x'' + c \cdot x' + k \cdot x + P$$

Donde $F_c(t)$ es la fuerza a la que se encuentra sometido el seguidor. Los términos x'' , x' y x representan a la aceleración, la velocidad y la distancia con que se mueve el centro de masa del tren seguidor. El término P representa la precarga anteriormente descrita.

Es imprescindible mantener a $F_c(t)$ siempre positiva. Como en general la aceleración es numéricamente mayor que la velocidad, es ésta la que causa que $F_c(t)$ sea negativa. Cuando esto ocurre el seguidor no está interactuando con la leva copiando su contorno. En un sistema con cierre de fuerza la leva sólo puede empujar sobre el seguidor, y no puede ejercer tracción. El resorte del seguidor proporciona la fuerza necesaria para mantener el contacto con la leva durante los intervalos de aceleración negativa (del seguidor). Si el resorte no provee una fuerza suficiente al seguidor, la leva y éste se separarán, lo que es una condición llamada **salto de seguidor**. Cuando se toquen de nuevo será con fuerzas de impacto muy intensas y potencialmente destructivas. El salto de seguidor probablemente ocurra cerca del punto de máxima aceleración negativa.

Para evitar ésta situación indeseable se debe seleccionar adecuadamente la constante del resorte y la precarga para garantizar una fuerza positiva en todos los puntos del ciclo.

En el caso de las levas para las válvulas de un motor de automóvil, el salto de seguidor se llama también **flotación de válvula** debido a que esta pieza (que es el seguidor) se suspende o 'flota' por encima de la leva, y periódicamente choca contra la superficie de su leva. Esto ocurrirá si la velocidad angular (r.p.m.) de la leva aumenta hasta el punto en que la mayor aceleración negativa hace también negativa a la fuerza del seguidor. El valor crítico de la velocidad de rotación del motor, con frecuencia indicada con una línea roja en el cuentavuelas, señala la inminente flotación de válvula, que dañará los mecanismos estudiados.

Anexo 1

Eje de levas y tren de válvulas

Explicación sobre funcionamiento de motores de explosión de 4 tiempos.

Uno de los componentes más importantes en un motor y a la vez uno de los más desconocidos es el eje de levas. El determina cuando, cuanto y como respira un motor. Entonces es fácil notar que sus características son cruciales en el funcionamiento de cualquier motor. De él depende, en gran parte, el carácter de un motor.

Antes de adentrarse en su mundo hay que entender que pasa en el interior de un motor de 4 tiempos..

Estas 4 etapas son: explosión, escape, admisión y compresión. Con la chispa de la bujía se inicia la explosión, en la cual el gas de mezcla aire-bencina se inflama y dilata violentamente, provocando el movimiento del pistón. Este movimiento dura 180° del cigüeñal y 90° del eje de levas, ya que este gira exactamente a la mitad de la velocidad del cigüeñal. Un poco antes que el pistón alcance el punto muerto inferior (PMI) se comienza a abrir la válvula de escape.

Al subir el pistón empuja por el múltiple de escape los gases quemados (etapa de escape) y así da espacio a una preciada carga de aire-bencina fresca. A medida que el pistón sube la válvula de escape se abre completamente y se comienza a cerrar. El cigüeñal gira otros 180°. Antes de llegar el pistón al PMS se comienza a abrir la válvula de admisión, cuando aun no se ha cerrado la de escape.

Aquí empiezan los problemas. ¿Por que están las 2 válvulas abiertas al mismo tiempo? ¿No se escapa bencina sin quemar por el escape? Si, de hecho, parte del combustible sin quemar se escapa hacia el tubo de escape y esto genera contaminación por hidrocarburos.

Este importante momento se llama traslape y se realiza porque los gases de escape que están saliendo rápidamente por el múltiple de escape hacen un efecto de "chupón" y aceleran los gases de admisión que entran al cilindro, además de asegurarse que haya salido todo el combustible ya usado. A bajas rpm basta con un pequeño traslape porque hay tiempo suficiente para llenar el cilindro, en cambio, a altas rpm es necesario un mayor tiempo de traslape porque los componentes mecánicos se mueven muy rápidamente, pero los gases no los siguen al mismo ritmo. Después de pasar por el PMS, la válvula de escape se cierra

rápidamente y la de admisión sigue abriéndose hasta llegar a su máxima abertura, usualmente a los 106° contados desde el PMS. Esta posición se puede variar al momento de instalar el eje de levas en el motor. Esta tercera etapa es la de admisión. Aquí se lleva a cabo el llenado del cilindro con el combustible y apenas se supera el PMI se cierra la válvula de admisión y ahora con las 2 válvulas en sus asientos, se comienza a crear presión efectiva en el cilindro.

El eje de levas esta compuesto de lóbulos, cuya forma da las características al eje de levas.

En los motores americanos hasta los años 80 era uno solo, colocado en el bloque, entre las bancadas. En los autos modernos va sobre la culata SOHC(Single OverHead Camshaft) o 2 sobre la culata DOHC(Dual OverHead Camshaft), donde uno maneja las válvulas de admisión y otro las de escape.

Los ejes de levas antiguos abren las válvulas mediante una serie de mecanismos que son: lóbulos, taqués, empujadores y balancines. Cada uno de estos componentes agregan errores, debilidades y esfuerzos extras al motor que llevaron al uso de los SOHC.

La parte "lisa" del eje de levas se llama circulo base, cuando ella esta pasando por el taqué, la válvula esta cerrada. Cuando el lóbulo correspondiente comienza a pasar por el taqué, el movimiento se transmite por el taqué al empujador, éste presiona el balancín colocado en la parte alta de la culata, que a su vez separa la válvula que se mantenía en su asiento gracias a un poderoso resorte. La alzada producida por el lóbulo se ve amplificada por el balancín, generalmente entre 1.5 y 1.7 veces. Por lo tanto, si el lóbulo tiene una alzada máxima de .300", el balancín de 1.5 separará la válvula 0.450" de su asiento. Los balancines pueden ser de 2 tipos: los tipo cazoleta y los roller. Estos últimos de uso más moderno, que tienen una especie de buje en la punta. Esto facilita enormemente el movimiento sobre la cola de la válvula y ofrecen una duración mucho mayor. Pueden liberar hasta 30hp producidos por roce.

Los taqués (lifters) pueden ser de tipo mecánico o hidráulicos. Los primeros son sólidos y se debe dejar un espacio entre los empujadores y los balancines para dar lugar a la dilatación de los metales con el calor. Por esto producen un golpeteo característico y éste golpe desajusta el tren de válvulas, así que necesitan de periódicos ajustes. Los hidráulicos se llenan de aceite y éste sirve para absorber la dilatación por el calor y no producen el golpeteo. La desventaja de los hidráulicos en comparación con los mecánicos es que por el acople de aceite que tienen se produce el efecto de flotación a altas rpm, en el cual la válvula permanece abierta y no se alcanza a cerrar por completo cuando debe (la válvula flota sobre su asiento). También existen versiones roller de ambos tipos de taqués. Ellos tienen una ruedecita que se apoya en los lóbulos del eje de levas. Reducen el roce y permiten lóbulos más radicales, cosa que no se puede hacer con taqués normales debido al rápido desgaste del sistema. Por lo mismo permiten llevar el motor a revoluciones más altas. Los taqués normales deben girar en sus lugares para producir un desgaste parejo, en cambio, los roller no deben girar y tienen un brazo que los une para que no lo hagan.

La duración en la apertura de las válvulas está determinado por la forma de los lóbulos de las levas.

Una duración menor favorece el torque en bajas revoluciones y una apertura mayor lo hace en altas revoluciones. La banda de torque tiene unas 3000rpm con taques normales y 3500 o 4000rpm con roller lifters. Por ejemplo, con una duración de 195° el motor tiene una zona de funcionamiento optimo entre las 1000 y las 4000 rpm, con uno de 220° entre las 2000 y 5000 rpm. El primero funciona muy bien en una camioneta y el segundo es mejor para un auto deportivo. Esta duración está medida a 0.050" de apertura y no desde el instante preciso en que comienza a abrirse la válvula. Es el mejor método para comparar ejes de levas entre distintos fabricantes. Se puede notar que a medida que se desplaza la banda de torque hacia arriba, se está perdiendo torque en baja, esto se produce porque la mayor duración viene de la mano con un mayor traslape en la abertura de las válvulas de admisión y escape, lo cual es poco eficiente a bajas rpm porque escapa mucha mezcla, pero funciona adecuadamente en alta. Para solucionar esto se debe usar una relación del diferencial de 3.55 o 3.73 y si la banda de torque esta más arriba, la relación del diferencial debe ser superior a 3.9:1, para dar una mejor salida al auto con el "poco" torque, y *por lo tanto no está* en baja que dispone. También se debe acompañar el cambio de diferencial con un cambio de convertidor de torque (autos automáticos) por uno de mayor velocidad de stall, por ejemplo 2000 rpm. Esto permite situar al motor en su banda de torque óptima.

Con respecto a la alzada de la válvula, conviene que esta sea mayor para permitir un mejor llenado del cilindro, pero siempre que la válvula no vaya a chocar con el pistón y que lo permita el resorte de válvula.

La mayor duración de abertura debe venir acompañada de un aumento en la compresión del motor.

Por cada 10° que aumente la duración debe aumentar 1 punto la compresión. Por ejemplo 200° con 9:1, 210° con 10:1. El aumento de compresión sirve para lograr una mayor presión efectiva, perdida con el eje de levas, y así recuperar el torque en baja.

El característico sonido (rateo y mayor intensidad) de los ejes de levas asociados a carreras viene de la mayor duración que tiene la abertura de válvulas y del traslape, lo que permite escuchar por el escape parte de la explosión del combustible.

La separación entre el punto de máxima abertura de admisión y máxima abertura de escape se conoce como Lobe Separation. Si esta distancia es grande, digamos 112°, la curva de torque es plana, el motor es más suave y más manejable en la calle. Si es corta, 106°, la curva de torque es más aguda, alcanza un peak más alto y luego cae rápidamente, el motor es más potente, pero con un ralenti inestable y más gastador. El punto donde se alcanza la máxima abertura de admisión con respecto al PMS es el Lobe Centerline, generalmente de 106°. Este punto se puede cambiar al momento de instalar el eje de levas. Se puede rotar el eje adelantándolo o retrasándolo. Por cada 4° que se adelanta el eje de levas, la curva de torque se desplaza 200 rpm hacia abajo. Si se retrasa 4°, la curva se desplaza 200 rpm hacia arriba.

Como en todo ámbito, hay un compromiso entre potencia, economía de combustible, emisiones, suavidad de manejo, etc. Por eso, en los años 90's se desarrolló el sistema de distribución variable, en donde se puede disponer de 2 ejes de levas en uno. Uno para economía y otro para un manejo más deportivo. Por ejemplo, el sistema Vtec cambia los ejes de levas sobre las 5000 rpm para usar un segundo grupo de lóbulos con características más deportivas, que le permite llegar hasta las 7500 rpm. Un sistema más moderno es el

ValveTronic de BMW, el cual funciona con un motor eléctrico en cada válvula en vez de un eje con lóbulos. Así se puede tener infinitos patrones de funcionamiento, ya que un computador determina cuando y cuanto abrir cada válvula.

Fuentes:

www.cranecams.com

www.compcams.com

www.hotrod.com

High Performance Restoration, Jason Scott, MBI, 1999.

Manual de Automóviles, M.Arias-Paz, 43ª edición.

Anexo 2

Uso del programa de diseño de levas "DYNACAM"

1 - Input Data (Datos de entrada)

Teclado

La primera elección en el menú de entrada, 'Type Data from Keyboard' (teclea los datos) permite el ingreso de datos específicos para el problema considerado. Primero requerirá la velocidad angular del eje de levas con el aviso de que debe ser de signo positivo (en el sentido de las agujas del reloj para este programa). Se suministra luego el número de segmentos en la pieza, que son comúnmente detenimientos, subidas, bajadas o combinaciones de estas dos últimas (para las polinomiales). El ángulo β , en grados, de cada segmento se ingresa luego. Si los valores de β no suman los 360° , se indicará que se reingresen los datos. Luego se pide una letra de código para cada segmento, una de: R (subida), F (bajada), D (detenimiento), P (polinomial).

Se requerirá un valor para el levantamiento (lift) total, H, necesario para un segmento que no sea detención. Este debe ser ingresado siempre con valor positivo, aún si se trata de un segmento de bajada.

Se requiere un valor de corrimiento (offset) para los segmentos que no son de detenimientos o de polinomial. El corrimiento no debe ser confundido con la excentricidad. El offset se usa para iniciar una subida o una bajada en otro sitio que no sea el círculo base o primario, con el fin de tener un 'efecto de escalera'. El offset es siempre un valor positivo, se mide hacia arriba desde la línea de desplazamiento cero.

Archivos de disco

La segunda lección, 'Read Data From DiskFile' permite introducir archivos en disco previamente almacenados desde el disco.

Ejemplos

Las elecciones 3, 4, 5 y 6 incluyen ejemplos integrados en el programa.

El primero de ellos es una leva con detenimientos que emplea funciones armónicas dobles. El segundo una leva con doble detenimiento que utiliza las funciones trapecial y senoidal, ambas modificadas. El tercero y el cuarto son dos levas de cuatro detenimientos con diversas combinaciones de funciones.

2 - Display Data (Despliegue de datos)

La configuración de leva actual puede verse en cualquier momento en esta elección. De esta manera aparecerán en pantalla todos los datos ingresados anteriormente. Se puede imprimir en cualquier momento la pantalla desplegada presionando las teclas <Shift>+<Prn. Scrn.>

3 - Compute S V A J (Determinación de S V A J)

Los cálculos deben realizarse en un segmento cada vez. Después de elegir el segmento, aparece la indicación 'Select Program Menu'. Hay cinco programas de levas estándares, una opción polinomial y una de detenimiento.

Funciones estándar. LOS PROGRAMAS DE LEVAS DE TIPO ESTÁNDAR (ELEMENTOS DE 1 A 5) CALCULAN AUTOMÁTICAMENTE SU BASE EN EL LEVANTAMIENTO TOTAL ESPECIFICADO EN FORMA PREVIA, Y SI ES UNA SUBIDA O UNA BAJADA EN ESE SEGMENTO.

Polinomios. La opción de polinomios requiere más información por parte del usuario. Deben ser proporcionados el número total de condiciones de frontera para el segmento. Se solicitan condiciones de frontera en cada extremo del segmento, primero en $\theta = 0$ y después en $\theta = \beta$. Para cada uno se efectuarán cuatro solicitudes: para las condiciones S, V, A, J. Se debe introducir un número correspondiente a la restricción de frontera deseada, o bien teclear 'n' para no tener ninguna restricción sobre la función en ese punto. Los ángulos son locales

para cada segmento y siempre van de cero hasta β . Debe repetirse el proceso de cálculo para cada segmento, incluso las detenciones.

4 - Print Results (Impresión de resultados)

El menú 'Print Select' permite la impresión de cualquier elección de los distintos tipos de diagramas y tablas de valores que el programa es capaz de realizar:

Displacement (curvas de desplazamiento)
Velocity (curvas de velocidad)
Acceleration (curvas de aceleración)
Jerk (curvas de choque)
Pressure Angle (ángulo de presión)
Radius of Curvature (radio de curvatura)
Dynamic Forces (fuerzas dinámicas)
Camshaft Torque (Torque)
S. V. A. J Table (diagramas de posición, velocidad, aceleración, choque)
Boundary Conditions (condiciones de frontera)

5 - Plot Results (Muestra de resultados en pantalla)

El menú 'Plot Select' es muy similar al anterior excepto que la opción 10 da un diagrama combinado de ángulo de presión y radio de curvatura en una pantalla.

6 - Compute Pressure Angle (Cálculo del ángulo de presión)

Esta opción requiere que se especifique el tipo de seguidor por emplear, de rodillo o de cara plana. Se solicitan el círculo primario o el de base deseados para la leva, y la excentricidad del seguidor. El cálculo puede hacerse para cualquier sector o para toda la leva. Los valores máximos y mínimos se reportan a la pantalla.

7 - Compute Radius of Curvature (Cálculo del radio de curvatura)

Estas pantallas de entrada son idénticas a las del cálculo del ángulo de presión. Si la elección es de un seguidor de cara plana, se solicitará un radio de curvatura mínimo deseado. A partir de este valor se reporta a la pantalla un radio mínimo del círculo base necesario para mantener positivo el radio de curvatura.

8 - Compute Dinamic Force and Torque (Cálculo de fuerza y torque dinámicos)

Ingreso de los datos necesarios para el cálculo de los esfuerzos dinámicos :
_m masa de los elementos móviles (seguidor, resorte, balancín, etc.).
_k constante elástica que engloba al resorte y a los otros elementos flexibles del sistema.
F{pt} precarga del resorte.
_ζ relación de amortiguamiento. Este valor por C_c (coeficiente de amortiguamiento crítico) el cual es determinado por el programa a partir de m, k, F_{pt}, que multiplicado por la relación de amortiguamiento nos proporciona el coeficiente de amortiguamiento C.

$$C = \zeta \cdot C_c \quad \text{y} \quad C_c = 2m \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$$

_Coeficiente de rozamiento del material de la leva.
_Coeficiente de rozamiento del material del seguidor.

9 - Draw Cam Profile (Trazo del perfil de la leva)

Esta selección hará el trazo de la leva terminada. Deben haberse realizado todos los cálculos incluso los de ángulo de presión y radio de curvatura, antes de que esta opción se pueda utilizar. El radio de curvatura mínimo aparece en pantalla y se solicita el diámetro de

seguidor de rodillo, si tal elección se hizo en los pasos 6 y 7 anteriores. De otro modo se reporta a la pantalla la anchura mínima del seguidor de cara plana, y se traza la leva.

La flecha curva indica el sentido de rotación de la leva. La posición inicial de un seguidor de rodillo en el ángulo de leva $\theta = 0$ se muestra como un círculo lleno con vástago rectangular, y un seguidor de cara plana como un rectángulo lleno. Cualquier excentricidad se mostrará como un corrimiento hacia arriba o hacia abajo del seguidor lleno. El menor círculo lleno en la línea central de la leva representa el eje de esta, el menor círculo no lleno es el círculo base. El círculo primario se desliza hacia fuera de la superficie de la leva. La curva de paso se traza a lo largo del lugar geométrico de los centros del seguidor de rodillo, y las líneas radiales que forman sectores dentro del círculo base, representan segmentos de la leva.

10 - Help (Ayuda)

Aquí podemos encontrar una ayuda limitada en la operación del programa (obviamente en inglés).

<ret> - Quit (Salir)

Presionando la tecla <Enter> se solicitará una confirmación de tal decisión al salir del programa. Una respuesta Y (de Si) hará terminar la ejecución y todos los datos en memoria se perderán a menos que se hayan guardado previamente en un archivo de disco.

Nota: el programa DYNACAM es de uso libre y para fines educativos.