

Contexto

1 - Principios generales

Hay dos grandes familias de máquinas que sirven para desplazar un fluido o generar un movimiento rotativo:

- las máquinas de pistones,
- las máquinas denominadas genéricamente "turbinas".

El funcionamiento de las máquinas de pistones se basa en la variación de volúmenes cuando los pistones se desplazan de su posición más baja hacia su posición más alta y a la inversa. Así es posible comprimir un fluido o hacer que se expanda un fluido comprimido, especialmente cuando se trata de un fluido gaseoso.

Estas máquinas de pistones están equipadas con mecanismos de transformación de un movimiento alternativo en un movimiento rotativo y viceversa.

Estos mecanismos, generalmente complicados, son a menudo sistemas de bielas, pero se encuentran también árboles de levas, platos, etc.

En estas máquinas, siempre hay rozamiento de los pistones con sus cilindros.

Para mantener la presión, deben estar equipados con segmentos de estanqueidad.

En la mayor parte de casos, entre los cuales se encuentran los compresores y los motores térmicos de combustión interna, hay que refrigerar el conjunto pistón-segmentos-cilindro para garantizar la calidad del aceite de lubricación con el fin de garantizar como mínimo un rozamiento en la capa límite entre los diferentes componentes.

El funcionamiento de las máquinas de tipo turbina se basa en la rotación de un rotor equipado con álabes en un estator. Por tanto, no necesitan transformador de movimiento.

Las turbinas no pueden funcionar a altas presiones, ya que no disponen de ningún dispositivo que permita hacer variar los volúmenes entre los álabes. Por definición, una turbina no es volumétrica.

Pero tienen una ventaja: los álabes no tienen fricción en el estator.

El apartado "Tecnologías" explica cómo es posible combinar las ventajas de la máquina de pistones y las de la turbina, es decir, creando una máquina:

- que no tenga transformador de movimiento;
- en la que los componentes que delimitan el volumen de trabajo funcionen sin fricción;
- en la que sea posible generar variaciones de volúmenes y de presiones;
- - en la que la estanqueidad se obtenga por pérdidas de carga controladas.

Contexto

2 - Casos particulares

2.1 - Termodinámica de los motores térmicos

2.11 - Principios de la termodinámica

La termodinámica se basa en los principios siguientes:

- la energía no puede crearse ni destruirse;
- las formas de energía solo pueden transformarse: el carburante en calor y el calor en energía mecánica;
- el calor nunca se puede transformar íntegramente en trabajo mecánico, a causa del rozamiento generado en los puntos de contacto de las piezas en movimiento;
- todos los procesos naturales y técnicos de transformación de energía son irreversibles y van en el sentido de lo más probable, el calor solo pasa libremente de los cuerpos más calientes a los cuerpos más fríos;
- el efecto inverso, es decir, que el calor pase de lo frío a lo caliente solo se puede conseguir con un aporte de energía.

2.12 - Tipos de transformaciones

Las transformaciones termodinámicas se designan según las condiciones en las que tienen lugar. Así, una transformación:

- a presión constante se denomina isobara;
- a volumen constante se denomina isócora;
- a temperatura constante se denomina isoterma;
- sin intercambio de calor se denomina adiabática;
- sin intercambio de calor y sin fricción se denomina isoentrópica;
- con cambio de estado general se denomina politrópica.

Cuando estudiamos los ciclos teóricos de los gases perfectos, podemos formular las leyes de estas transformaciones porque podemos utilizar la constante que debemos a L. J. Gay Lussac (1778 - 1850): $PV = RT$. Enunció la constante: $PV = R(273 + t)$, que se aproxima a $PV = R(273,15 + t)$.

La ley de Gay-Lussac combinada con la de Boyle-Mariotte permitirá establecer unos años más tarde la ley de los "gases perfectos" cuya ecuación de estado se escribe $PV = nRT$ o $PV = NkT$, que se basa en los modelos simples de los gases en los sistemas termodinámicos.

2.13 - Principio de funcionamiento

La energía química contenida en el carburante se transforma en calor mediante una combustión que requiere oxígeno y esta energía calorífica se convierte en trabajo con la ayuda de componentes mecánicos que constituyen un conjunto llamado motor térmico.

2.14 - Clasificación de los motores térmicos

Cuando la combustión ocurre en el interior del motor, se habla de combustión interna. Hay entonces dos posibilidades y en ambos casos el circuito está abierto:

- bien el proceso de trabajo es cíclico y es necesario alternativamente introducir carga fresca y comprimir una porción de gases quemados, es lo que ocurre en los motores de pistones alternativos;

Contexto

- o bien el proceso de trabajo es continuo y el reemplazo de la carga se realiza sin interrupción, como en las turbinas de gas.

Cuando la combustión ocurre en el exterior del motor, se habla de combustión externa. En este caso, el proceso de trabajo puede ser continuo y el circuito cerrado, ya que el fluido motor puede mantenerse químicamente inalterado y sufrir cambios de estado sin haber sido reemplazado.

El acondicionamiento de la mezcla aire-carburante en el exterior del lugar de combustión favorece la homogeneización. Se habla entonces de acondicionamiento externo u homogéneo de la mezcla.

Cuando la mezcla ocurre en el interior del lugar de combustión, se hace en unas condiciones menos favorables. Por tanto, es heterogénea. Entonces se habla de acondicionamiento interno o heterogéneo de la mezcla.

Si la combustión se inicia mediante una chispa eléctrica, se habla de encendido por chispa, pero si la mezcla se inflama espontáneamente porque alcanza la temperatura de inflamación, se habla de autoencendido.

2.15 - Ciclos termodinámicos

La conversión de la energía calorífica en energía mecánica solo es posible si el fluido motor cambia de estado.

Estos cambios de estado se representan generalmente mediante diagramas que representan dos magnitudes de estado:

- subida o bajada de la temperatura;
- aumento o disminución de la presión;
- aumento o reducción del volumen.

Generalmente las coordenadas de un diagrama representan las relaciones:

- presión-volumen en un diagrama p-V;
- temperatura-entropía en un diagrama T-S;
- entalpía-entropía en un diagrama H-S.

El estudio de la termodinámica ha impulsado a diversos científicos a proponer ciclos de funcionamiento. Solo nombraremos los que todavía se emplean en nuestros días:

- A. Beau de Rochas en 1862 (1815 - 1893) inventó la compresión y el ciclo de cuatro tiempos. Es el ciclo de referencia para los motores de gasolina en cuatro tiempos hoy en día.
- N.A. Otto construyó en 1867 un motor según este ciclo, pero debió abandonar su trabajo a causa de un pleito, ya que no era el propietario de las patentes.
- J. Joule . (1818 - 1889) inventó el ciclo a presión constante. Es el ciclo de referencia para los motores del tipo de turbinas de gas.
- Sabathé, de nombre desconocido, fue el primero en preconizar un ciclo mixto conjugando los ciclos de A. Beau de Rochas y de R. Diesel. Es el ciclo de referencia para los motores de gasóleo que muchas personas llaman todavía erróneamente "motor Diesel".

Contexto

2.16 - Requisitos para los carburantes

Los carburantes utilizados en los motores se clasifican en tres categorías que determinan las condiciones que deben cumplir:

- la categoría de los carburantes que se destinan a los motores de acondicionamiento homogéneo y de encendido por chispa;
- la categoría de los carburantes que se destinan a los motores de acondicionamiento heterogéneo y de autoencendido;
- la categoría de los carburantes que se destinan a los motores de tipo turbina de gas cuya llama es continua.

Entre los carburantes destinados a un acondicionamiento homogéneo, figuran las gasolinas con plomo, las gasolinas sin plomo, los gases licuados de petróleo, etc.

Estos carburantes deben ser muy volátiles para favorecer el acondicionamiento homogéneo de la mezcla aire-carburante. Sin embargo, es necesario imponer exigencias elevadas a las características de volatilidad, entre las cuales:

- la curva de ebullición que da el porcentaje de carburante vaporizado en función de la temperatura;
- la presión de vapor;
- la relación vapor-líquido que permite determinar la tendencia del carburante para formar las burbujas de vapor;
- la masa volumétrica que permite determinar ciertos tipos o componentes de carburantes;
- el contenido en plomo que no hay que superar;
- el índice de octano que caracteriza el poder antidetonante de la gasolina.

Estos requisitos están normalizados!

Entre los carburantes destinados a un acondicionamiento heterogéneo figura un nombre: gasóleo.

Es una mezcla de diferentes hidrocarburos en la cual el punto de ebullición se sitúa aproximadamente entre 180° y 360° Celsius.

Los principales requisitos impuestos al gasóleo son:

- masa volumétrica;
- curva de ebullición;
- viscosidad cinemática;
- punto de inflamación;
- índice de cetano.

Estos requisitos también están normalizados!

Los principales requisitos para los carburantes destinados a las turbinas de gas se limitan a:

- viscosidad;
- cantidad de impureza de todo tipo, en particular azufre, sodio, vanadio y plomo.

Los motores de combustión externa son los que tienen menos requisitos para el carburante. En efecto, el fluido motor y los gases de combustión a menudo no son los mismos. Basta que el carburante queme suficientemente rápido sin dejar residuo.

Contexto

2.17 - Combustión

La combustión se desarrolla de dos maneras diferentes:

- de manera cíclica en los motores de pistones alternativos después de cada reemplazo de la carga;
- de manera continua en los motores de tipo turbina de gas.

Es la combustión cíclica la que da más problemas. En efecto, debe tener lugar en un tiempo récord. Así, en un motor de cuatro tiempos que gira a 6000 revoluciones por minuto, el ciclo tiene lugar en: $1/(6000/2/60) = 1/50 = 0,02$ s.

Ahora bien, como el ciclo comprende una aspiración, una compresión, una regulación y un escape, y como la combustión solo puede tener lugar durante la regulación, esta solo puede durar: $0,02/4 = 0,005$ s.

Estos intervalos se dividen aproximadamente por tres en un motor de dos tiempos.

En los motores de acondicionamiento homogéneo y con encendido por chispa, la fase de inflamación es prácticamente constante en el tiempo y solo depende de la composición de la mezcla, entonces el desprendimiento de calor es ante todo determinado por la forma de la cámara de combustión y la posición del punto de encendido.

La velocidad de combustión es determinada por el proceso de difusión ante las llamas, por la intensidad de las turbulencias y la evolución de la temperatura en la parte de la mezcla que no se quema todavía.

La duración de inflamación, al ser constante en el tiempo y como debe tener lugar antes que la regulación, requiere un dispositivo que permite ajustar el momento del encendido obtenido en forma de avance al encendido, con el fin de que la energía calorífica contenida en el carburante se encuentre en su máximo cuando debe ser transformada en energía mecánica durante la regulación.

En los motores de acondicionamiento heterogéneo, la autoinflamación tiene lugar poco antes del fin de la compresión. Entonces el carburante es inyectado en el aire fuertemente comprimido y calentado a una temperatura situada entre 700° y 900° Celsius.

La combustión tiene lugar en dos fases, lo que demuestra que se trata de una combustión según el ciclo de Sabathé:

- una fase durante la cual el carburante inyectado antes del inicio del encendido se inflama: se trata del aporte de calor isócoro, según el ciclo de A. Beau de Rochas;
- una fase durante la cual el carburante inyectado después del inicio de la combustión va a quemarse: se trata del aporte de calor isóbaro, según el ciclo de R. Diesel.

La combustión continua en los motores de tipo turbina de gas o de combustión externa debe ser estable y regular. Es lo que se le pide principalmente.

Contexto

2.18 - Rendimiento termodinámico

El rendimiento termodinámico de un motor térmico depende de la cantidad de calor disipada, es decir, perdida. Es igual a:

$$\eta = (\theta' - \theta'') / \theta''$$

donde η es el rendimiento,
 θ' la cantidad de calor aportada y
 θ'' la cantidad de calor disipada.

2.2 - Configuración mecánica de los motores térmicos

2.21 - Motores alternativos de gasolina de cuatro y de dos tiempos

El motor alternativo de gasolina es un motor de acondicionamiento homogéneo de la mezcla aire-carburante y con encendido por chispa.

El carburante es principalmente gasolina, pero también puede ser un producto de sustitución como el gas licuado de petróleo.

El acondicionamiento se realiza bien en el carburador, bien indirectamente en el colector de admisión, o bien directamente en el cilindro, en los cuales el carburante se inyecta cíclicamente.

La mezcla se comprime periódicamente en un cilindro de trabajo hasta una presión que varía entre 15 y 25 bar.

La temperatura de compresión resultante que varía entre 400° y 600° Celsius todavía es inferior al umbral de autoinflamación de forma que la mezcla se debe inflamar para conseguir la transformación del carburante en energía calorífica.

La inflamación provocada por una chispa tiene lugar a una velocidad muy elevada. Genera un aumento de la presión igual a aproximadamente siete veces la obtenida al final de la compresión, cuando la presión media eficaz es aproximadamente igual a la obtenida al final de la compresión.

Estos valores no se pueden calcular con exactitud a causa de las numerosas variables que intervienen simultáneamente. Es una de las razones por las cuales la fabricación de un motor de gasolina está ampliamente condicionada por el empirismo.

La renovación de la carga se realiza en un motor de cuatro tiempos con la ayuda de un dispositivo de válvulas, o en un motor de dos tiempos mediante luces dispuestas cerca del punto muerto inferior.

El trabajo útil generado se transforma mediante un mecanismo de bielas en un par motor disponible en el extremo del cigüeñal. Este sistema de bielas es complejo y requiere que el motor gire al ralentí a regímenes de entre 800 y 1200 revoluciones por minuto para no calar el motor. Ello representa un consumo de carburante importante, especialmente donde la circulación no es fluida.

Contexto

A partir de ahora podemos constatar que:

- la relación entre la fatiga máxima de los componentes mecánicos sometidos al pico de presión y la fatiga media de estos componentes es igual a p_{\max}/p_{me} ;
- el dimensionamiento de estos componentes viene determinado por el pico de presión (**presión de punta**) a la que se añade un margen de seguridad, y no por la presión media eficaz, lo que requiere componentes ampliamente sobredimensionados.

Ventajas del motor de gasolina:

- su diseño se domina desde hace decenios;
- estructuras económicas basadas en este motor;
- configuración pistón/cilindro que favorece las presiones elevadas.

Inconvenientes del motor de gasolina:

- requiere carburantes sofisticados;
- mala relación p_{\max}/p_{me} ;
- bajo rendimiento: solo aproximadamente el 30% de la energía calorífica contenida en el carburante se transforma en energía mecánica;
- emisiones de gases tóxicos relativamente elevadas: NO, HC, CO;
- ruidoso;
- requiere una caja de cambios.

2.22 - Motores alternativos de gasóleo de cuatro y de dos tiempos

El motor alternativo de gasóleo es un motor de acondicionamiento homogéneo de la mezcla aire-carburante.

El acondicionamiento se realiza en el cilindro o en una cámara habilitada en la culata, pero que desemboca en el cilindro. La cámara de Ricardo es un ejemplo de ello.

Las operaciones que tienen lugar son comparables a las del motor de gasolina, excepto:

- el aire se comprime hasta un valor de 30 a 55 bar;
- la temperatura de compresión varía entre 700° y 900° Celsius para superar el umbral de autoinflamación;
- la inyección tiene lugar un poco antes del punto muerto superior;
- la presión máxima sube a veces hasta 200 bar, pero generalmente se encuentra alrededor de 150 bar, algunos motores de laboratorio han detectado aumentos de la presión a más de 240 bar;
- la presión media eficaz no supera el 30% de la obtenida al final de la compresión en los motores de gasóleo atmosféricos, mientras que se limita a la obtenida al final de la compresión en los motores con refrigeración del aire de sobrealimentación.

El margen de seguridad en los motores de inyección de gasóleo debe ser bastante mayor que en los motores de gasolina, ya que hay que tener en cuenta fallos en la autoinflamación que aumentan las presiones máximas en la revolución siguiente.

De ello se deduce que, teniendo en cuenta las presiones de compresión elevadas presentes en los motores de gasóleo, las presiones máximas provocadas por la inflamación espontánea exigen un grupo motor relativamente pesado.

Contexto

Y como los motores de acondicionamiento heterogéneos deben funcionar con un exceso de aire importante, incluso a plena carga, los motores de gasóleo tienen una densidad de potencia baja.

Ventajas del motor de gasóleo:

- su diseño se domina desde hace mucho tiempo;
- estructuras comerciales basadas en este motor;
- configuración pistón/cilindro que favorece las presiones elevadas.

Inconvenientes del motor de gasóleo:

- el coste de fabricación resulta elevado;
- mala a muy mala relación p_{max}/p_{me} ;
- baja densidad de potencia, la cilindrada de un motor de gasóleo es generalmente 1,5 veces superiora la de un motor de gasolina para la misma potencia;
- bajo rendimiento: solo aproximadamente el 30% de la energía calorífica contenida en el carburante se transforma en energía mecánica;
- emisiones de gases desfavorables: hollín e inquemados;
- de ruidoso a muy ruidoso;
- requiere una caja de cambios de gran capacidad.

2.23 - Turbina de gas

La turbina de gas es un motor de acondicionamiento heterogéneo de la mezcla aire-carburante y con llama continua.

Es un motor policarburante que admite combustibles líquidos, gaseosos o emulsionados.

El acondicionamiento se realiza en una cámara de combustión independiente donde un inyector reparte de forma precisa el combustible en el aire comburente para que la mezcla se realice de forma que se obtenga una tasa de combustión elevada.

Se realiza la compresión y el trabajo se obtiene con ayuda de turbinas de álabes que giran sin fricción en su alojamiento respectivo.

La configuración así obtenida permite regímenes muy elevados, flujo de gases que alcanza y supera a veces en ciertos lugares del sistema la velocidad del sonido, aunque los cálculos se basen en una velocidad máxima de los gases del orden de 0,8 a 0,9 Mach.

En primer lugar el aire aspirado se comprime hasta un valor de unos 4 a 6 bar, atraviesa en algún caso un intercambiador de calor en el cual aumenta su temperatura, alcanza la cámara de combustión donde se asocia al carburante para formar un gas que al quemarse aumenta de temperatura, aumentando así de volumen. Los gases ceden una parte de su energía a una turbina de trabajo, en su caso pierden otra parte de la energía en el intercambiador de calor y disipan el resto a la atmósfera.

Como las presiones de trabajo no son muy elevadas, la potencia solo puede obtenerse a partir de los regímenes que dependen lógicamente del tamaño de la turbina. Así, una turbina de gas que se destinará a la automoción funcionará en una gama de regímenes que variará entre 8000 y 70 000 revoluciones por minuto.

Contexto

Ventajas de la turbina de gas:

- funcionamiento policarburante;
- funcionamiento regular;
- buena relación p_{max}/p_{me} ;
- emisiones de gases favorables sin equipamiento adicional.

Inconvenientes de la turbina de gas:

- bajo rendimiento: menos del 30% de la energía calorífica contenida en el carburante se transforma en energía mecánica;
- bajas presiones de trabajo;
- regímenes a menudo demasiado elevados;
- coste de fabricación elevado;
- consumo de carburante elevado;
- se adapta mal a las potencias bajas;
- ruidoso por la velocidad de los gases;
- requiere reductores caros.

2.24 - Lubricación

En el motor de uso más común es donde la lubricación es más compleja. En efecto, el motor alternativo tiene numerosos puntos que hay que lubricar, en particular el conjunto pistón-segmentos-cilindro o camisa, que representa desde el punto de vista de la lubricación la configuración más delicada:

- por un lado, es necesario que la combustión tenga lugar a temperaturas superiores a 2000 K para que esta sea lo más completa posible;
- por otro lado, la temperatura de funcionamiento del aceite utilizado para la lubricación de la guía de los pistones en su cilindro no debe superar 125° Celsius para no pegarse.

A este nivel, la turbina de gas es más práctica, ya que los álabes no entran en contacto con su alojamiento respectivo.

2.25 - Refrigeración

Dado que un aceite que se quema pierde su poder lubricante, es necesario que, conocida la configuración del motor alternativo, las piezas que se exponen al calor generado por la combustión se refrigeren intensamente para que el aceite mantenga su poder lubricante.

Esta refrigeración provoca la evacuación forzada de más del 30% de la energía calorífica contenida en el carburante: se retira por un lado una parte de lo que se ha introducido por el otro.

2.25 - Gases de escape

En los motores alternativos, más del 30% de la energía contenida en el carburante se disipa por el escape:

- en forma de calor, ya que al ser igual el volumen de regulación al volumen de compresión, dicho volumen de regulación no es superior al volumen de compresión en una relación proporcional a la cantidad de calor añadida durante la combustión;
- en forma de hidrocarburos parcialmente o perfectamente inquemados, ya que los tiempos invertidos en el carburante para cambiar completamente de estado son demasiado cortos,

Contexto

en efecto, de 0,002 a 0,01 s no son suficientes, y la relación aire-carburante no es siempre favorable a una buena oxigenación.

En las turbinas de gas, los tiempos de paso de los gases en combustión son demasiado cortos para permitir obtener una regulación y una refrigeración que limiten las pérdidas por el escape. Por tanto del 70 al 80% de la energía calorífica contenida en el carburante se disipa en forma de calor, excepto en el caso en que este calor se transmita parcialmente al aire comprimido por medio de un intercambiador de calor.

2.3 - Balance y conclusión

2.31 - Balance

Para este balance, establecemos la siguiente tabla comparativa:

Objeto de la comparación	motor alternativo de gasolina	motor alternativo de gasóleo	turbina de gas
Relación volumen de regulación / volumen de trabajo	igual a 1	igual a 1	superior a 1
Intercambio de calor	imposible	imposible	realizable
Elección de carburantes	normalizado	normalizado	libre
Modo de combustión	cíclico	cíclico	continuo
Resistencia a presiones	elevado	elevado	modesto
Relación presión máxima / presión media eficaz	mala	mala	favorable
Energía calorífica transformada en energía mecánica	30 a 35% según las circunstancias	30 a 35% según las circunstancias	20 a 30 % según las circunstancias
Pérdidas por el sistema de refrigeración	30 a 35% según las circunstancias	30 a 35% según las circunstancias	nada
Pérdidas por el sistema de escape	30 a 35% según las circunstancias	30 a 35% según las circunstancias	70 a 80 % según las circunstancias
Emisiones de gas	tóxicas	tóxicas	aceptables
Nivel sonoro	elevado	elevado	elevado
Fricción en el volumen de trabajo	si	si	no
Lubricación en el volumen de trabajo	peligrosa	peligrosa	inútil
Refrigeración	obligatoria	obligatoria	inútil
Caja de cambios	obligatoria	obligatoria	
Reductor del régimen			obligatoria

Contexto

2.32 - Conclusión

Para construir un motor térmico, bastará recordar los argumentos siguientes, que tomamos de los párrafos precedentes:

- Los motores de combustión externa son los que tienen menos requisitos para el carburante. En efecto, el fluido motor y los gases de combustión a menudo no son los mismos. Basta que el carburante queme suficientemente rápido sin dejar residuo.
- La combustión continua en los motores de tipo turbina de gas o de combustión externa debe ser estable y regular. Es lo que se le pide principalmente.
- Ventajas del motor de gasolina: configuración pistón/cilindro que favorece las presiones elevadas.
- Ventajas del motor de gasóleo: configuración pistón/cilindro que favorece las presiones elevadas.
- Ventajas de la turbina de gas: funcionamiento policarburante, funcionamiento regular, buena relación presión máxima/presión media eficaz, valores de emisión favorables sin equipamiento.

Como nos encontramos, por decirlo así, ante una hoja de papel blanca, los puntos siguientes se deben recordar para elaborar nuestras especificaciones técnicas:

- motor de combustión externa;
- funcionamiento policarburante;
- configuración que favorezca las presiones elevadas;
- configuración que favorezca las temperaturas elevadas;
- funcionamiento regular y silencioso;
- buena relación presión máxima / presión media eficaz;
- valores de emisiones de gases favorables sin equipamiento, por tanto, sin sistema de escape;
- sin lubricación en el volumen de trabajo;
- sin refrigeración del volumen de trabajo;
- sin caja de cambios;
- sin transformador de movimiento.

Los apartados "Tecnología" y "Aplicaciones" demuestran que estas especificaciones técnicas pueden cumplirse.