

Desarrollo de un controlador de la relación aire-combustible basado en periodos mediante un sensor de conmutación de bajo coste

Artículo cedido por Mathworks

 **MathWorks**
www.mathworks.com

Autor: Peter Maloney,
MathWorks

Este artículo describe un método para controlar la AFR que combina el coste bajo de un sensor de oxígeno de conmutación convencional y la calibración racionalizada de la eficiencia de conversión del catalizador que permite el ajuste directo de la amplitud, la frecuencia y la desviación de la AFR de escape.

El control de la proporción entre aire y combustible (λ o AFR por sus siglas en inglés) resulta esencial para mejorar el rendimiento de un motor de automoción y, cuando se combina con un catalizador de tres vías (TWC), reduce significativamente las emisiones automotrices perjudiciales. A fin de controlar la AFR, el combustible se inyecta en la admisión o directamente en el cilindro del motor tras medir o estimar la masa de aire sin quemar en el cilindro y, a continuación, se corrige el combustible inyectado de acuerdo con las mediciones de un sensor de oxígeno del gas de escape situado más adelante (Figura 1).

A fin de lograr simultáneamente una eficiencia correcta del combustible y un nivel bajo de emisiones de escape, un catalizador de tres vías situado después del

Figura 1. Diagrama de un cilindro de escape que indica el retardo de transporte entre el punto de inyección y el sensor de oxígeno.

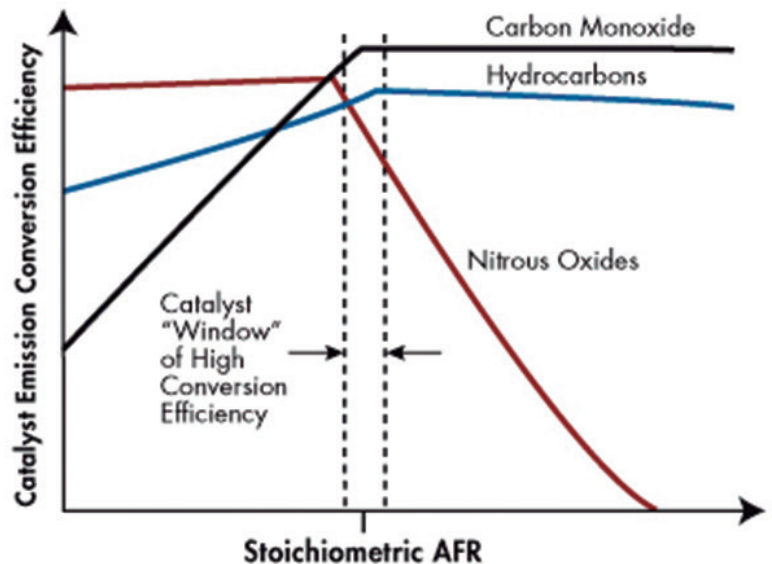
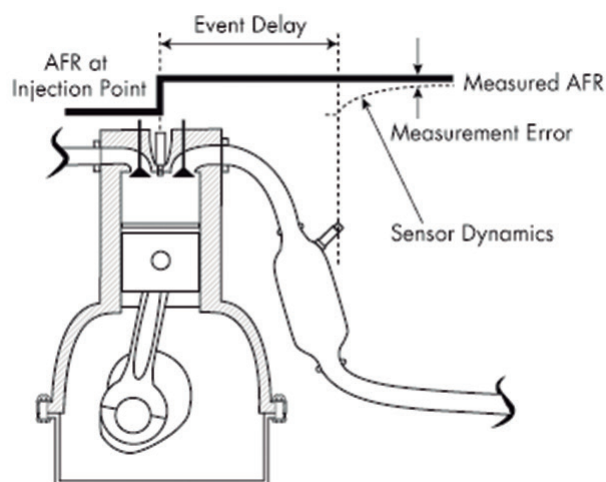


Figura 2. Ventana catalítica en la que el catalizador alcanza su máxima eficiencia en la conversión de emisiones perjudiciales del tubo de escape.

motor convierte los contaminantes nocivos en emisiones no perjudiciales. Los catalizadores funcionan de manera más eficiente cuando la AFR de escape está próxima a la AFR estequiométrica, que es también cuando el aire y el combustible se queman de forma más completa. Alrededor de este punto ideal, se dice que la AFR está dentro de la ventana catalítica, en la cual el catalizador alcanza su máxima eficiencia en la conversión del monóxido de carbono, los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno en productos de escape no perjudiciales (Figura 2). Existen estudios empíricos que demuestran que la oscilación de la AFR cerca de la estequiometría con una frecuencia, una amplitud y una desviación de la AFR optimizadas amplía la ventana catalítica, aumentando así la eficiencia de conversión del catalizador en presencia de perturbaciones ineludibles [1].

Para mantener bajos los costes de producción, los fabricantes del sector de la automoción diseñan

sistemas de control de AFR basados en sensores de oxígeno (sondas λ) de conmutación de bajo coste colocados en el escape del motor antes y después del catalizador.

Los sensores de oxígeno utilizados más habitualmente en la industria hoy en día tienen un rango muy limitado; básicamente, cambian entre AFR pobre (aire por encima

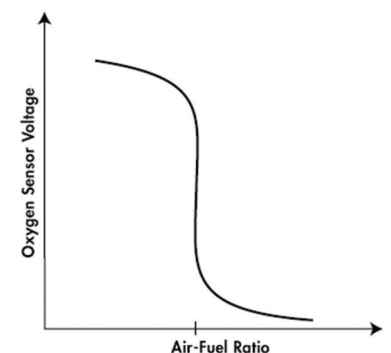


Figura 3. Característica de tensión del sensor de oxígeno de conmutación frente a la proporción aire-combustible.

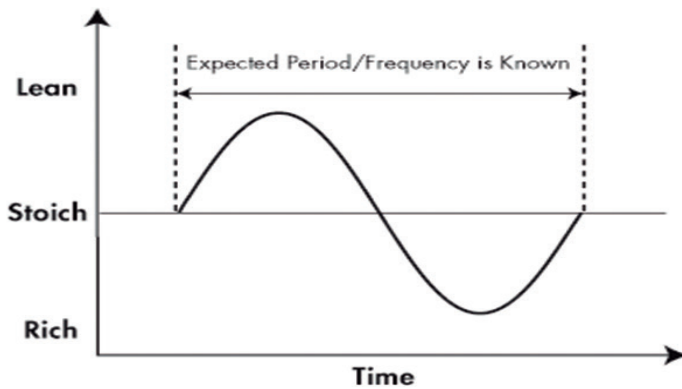


Figura 4. Alternancia entre AFR pobre y AFR rica, representada como una onda sinusoidal centrada en una mezcla estequiométrica.

de la proporción estequiométrica) y AFR rica (aire por debajo de la proporción estequiométrica) (Figura 3) [2].

La calibración de los sistemas de control proporcionales integrales (PI) tradicionales diseñados para estos sensores de conmutación pueden resultar difíciles de calibrar. En concreto, encontrar la frecuencia, la amplitud y la desviación que maximizan la eficiencia del TWC supone un reto, ya que la modificación de las ganancias del controlador afecta a la frecuencia y la amplitud de la AFR de escape solo de forma indirecta. Además, los efectos de la modificación de las ganancias son difíciles de evaluar, dado que el retardo de transporte (el tiempo entre el cambio de la mezcla de AFR y el cambio resultante en la AFR de escape) varía según las condiciones de funcionamiento del motor.

Una forma de hacer más directa la relación entre las ganancias del controlador, por un lado, y la frecuencia y la amplitud de la AFR del TWC, por otro, es usar un sensor de oxígeno de banda ancha. Este tipo de sensor proporciona realimentación continua al determinar en qué medida la mezcla es rica o pobre, reduciendo así la oscilación del control PI tradicional provocada por el retardo de transporte del motor. Con frecuencia se emplean sensores AFR de banda ancha en el desarrollo de vehículos, pero, por lo general, se consideran demasiado caros para su uso en la fabricación en serie.

Mis colegas y yo hemos diseñado e implementado un método para controlar la AFR que combina lo

mejor de ambos mundos: el coste bajo de un sensor de oxígeno de conmutación convencional y la calibración racionalizada de la eficiencia de conversión del catalizador que permite el ajuste directo de la amplitud, la frecuencia y la desviación de la AFR de escape. Este método se basa en un concepto presentado por Meyer et al [3]. Utilizamos el diseño basado en modelos para acelerar el diseño, el desarrollo y la validación del controlador en Simulink® y Stateflow®. Mediante una combinación de Simscape™ y Model-Based Calibration Toolbox™, construimos un modelo de planta de un motor para simulaciones de bucle cerrado y, a continuación, generamos el código de producción para un controlador de motor Pi Innovo OpenECU M220 [4] con Embedded Coder.

Diseño de un método de control de la AFR basado en periodos

Con el fin de desarrollar un método para un control de la AFR que combine el bajo coste de los sensores de conmutación y la calibración más sencilla de la frecuencia, la amplitud y la desviación de la AFR que aportan los sensores de banda ancha, empezamos con la simple suposición de que, si controláramos la AFR en el punto de inyección como una onda sinusoidal centrada en la mezcla estequiométrica, la AFR de escape también sería una onda sinusoidal. En una situación ideal, la onda sinusoidal de la AFR de escape también estaría centrada

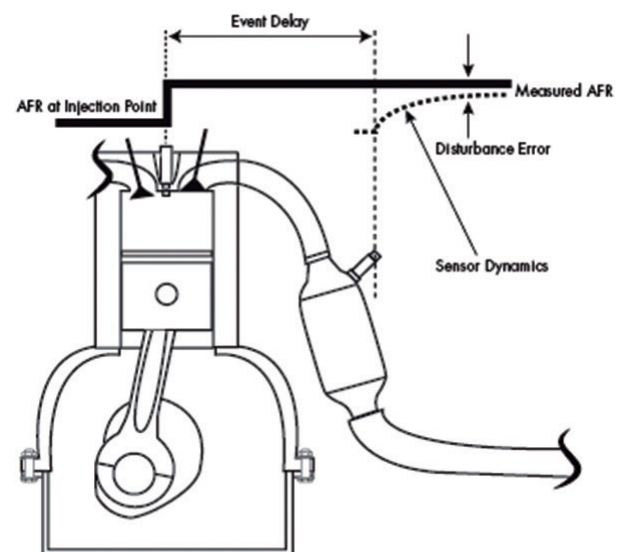
en la AFR óptima del catalizador (Figura 4). En régimen estacionario, el calibrador del motor ajusta directamente la amplitud, la frecuencia y la desviación de la AFR de la senoide de inyección a fin de optimizar la eficiencia de conversión del TWC. Las frecuencias, amplitudes y desviaciones típicas son de 0,25 Hz a 1 Hz, AFR de 0,25 a 1 y desviación de AFR entre 0 y 0,2, respectivamente.

En los casos en que queremos que el motor funcione con una AFR pobre, la onda sinusoidal se eleva y, cuando queremos que el motor funcione con una mezcla rica, la onda sinusoidal desciende (Figura 5).

Con una mezcla pobre, cuando la senoide sube, el sensor de oxígeno de conmutación indica un mayor tiempo de mezcla pobre y un menor tiempo de mezcla rica para cada periodo de la onda sinusoidal.

Con una mezcla rica, el sensor indica un mayor tiempo rico y un menor tiempo pobre. La diferencia entre los tiempos medidos de mezcla pobre y rica está directamente relacionada con la riqueza o pobreza con la que funciona el motor. Las ecuaciones 1a y 1b definen la relación entre la desviación de la AFR medida y las mediciones de periodos ricos y pobres utilizadas para calcular el error del controlador de AFR.

Tal y como se indica en Meyer et al [3], el hecho de inyectar una oscilación de AFR conocida antes del motor y después medir si la AFR es pobre o rica en función del tiempo



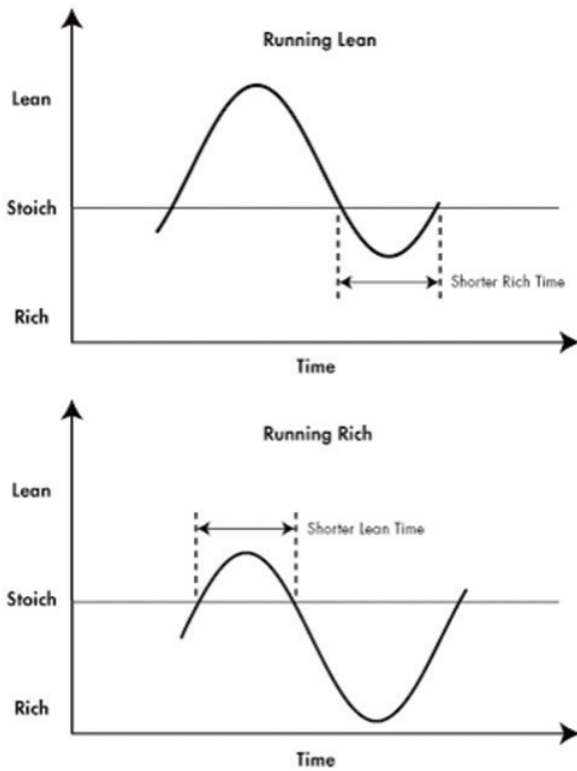


Figura 5. Arriba: onda sinusoidal de AFR cuando la mezcla es pobre. Abajo: onda sinusoidal de AFR cuando la mezcla es rica..

de cruce en la parte de escape del motor elimina la necesidad de compensar las ganancias de realimentación del controlador en relación con los retardos de transporte desconocidos y variables en el motor.

$$C_{lean} = \frac{\pi - \sin^{-1}\left(\frac{AFR_{stoich} - AFR_{cmd}}{A_{cmd}}\right)}{2\pi f_{cmd} \Delta t} \quad (1a)$$

$$C_{rich} = \frac{1}{2f_{cmd} \Delta t} - C_{lean} \quad (1b)$$

Donde:

C_{lean} es el número esperado de recuentos de mediciones de tensión del sensor de AFR pobres entre cruces de tensión estequiométrica;

C_{rich} es el número esperado de recuentos de mediciones de tensión del sensor de AFR ricos entre cruces de tensión estequiométrica;

AFR_{stoich} es la proporción aire-combustible estequiométrica para la química del combustible utilizada en la aplicación del motor;

AFR_{cmd} es la proporción aire-combustible media esperada del gas de escape en función del comando de ancho de pulso promedio enviado al hardware de inyección de combustible;

A_{cmd} es la amplitud de la proporción aire-combustible esperada del gas de escape en función de la amplitud del comando de ancho de pulso enviado al hardware de inyección de combustible;

f_{cmd} es la frecuencia de la proporción aire-combustible esperada del gas de escape en función de la frecuencia del comando de ancho de pulso enviado al hardware de inyección de combustible;

Δt es el periodo de muestreo fijo de la medición de tensión del sensor de oxígeno.

Implementamos directamente la función arcsine de la ecuación (1a) en nuestra ECU M220 de Pi Innovo. La función arcsine no es un cálculo difícil en una ECU de coma flotante moderna.

Con las ecuaciones (1a-b) en la ECU, ahora podemos cuantificar la AFR en un rango limitado mediante un sensor de conmutación de la misma forma que si utilizáramos un sistema con un sensor de banda ancha.

Desarrollo de un controlador de la AFR mediante el diseño basado en modelos

Con el fin de implementar este nuevo concepto de control de AFR, empleamos Simulink y Stateflow para modelar un controlador que calcula el tiempo de mezcla pobre y de mezcla rica esperado para una entrada sinusoidal de AFR concreta y, a continuación, produce una señal de error de AFR basada en la diferencia entre esos tiempos y los tiempos medidos por el sensor de oxígeno de conmutación.

Mediante Simscape y Model-Based Calibration Toolbox, creamos un modelo de valor medio del motor para su uso como modelo de planta en simulaciones de lazo cerrado del diseño íntegro (Figura 6).

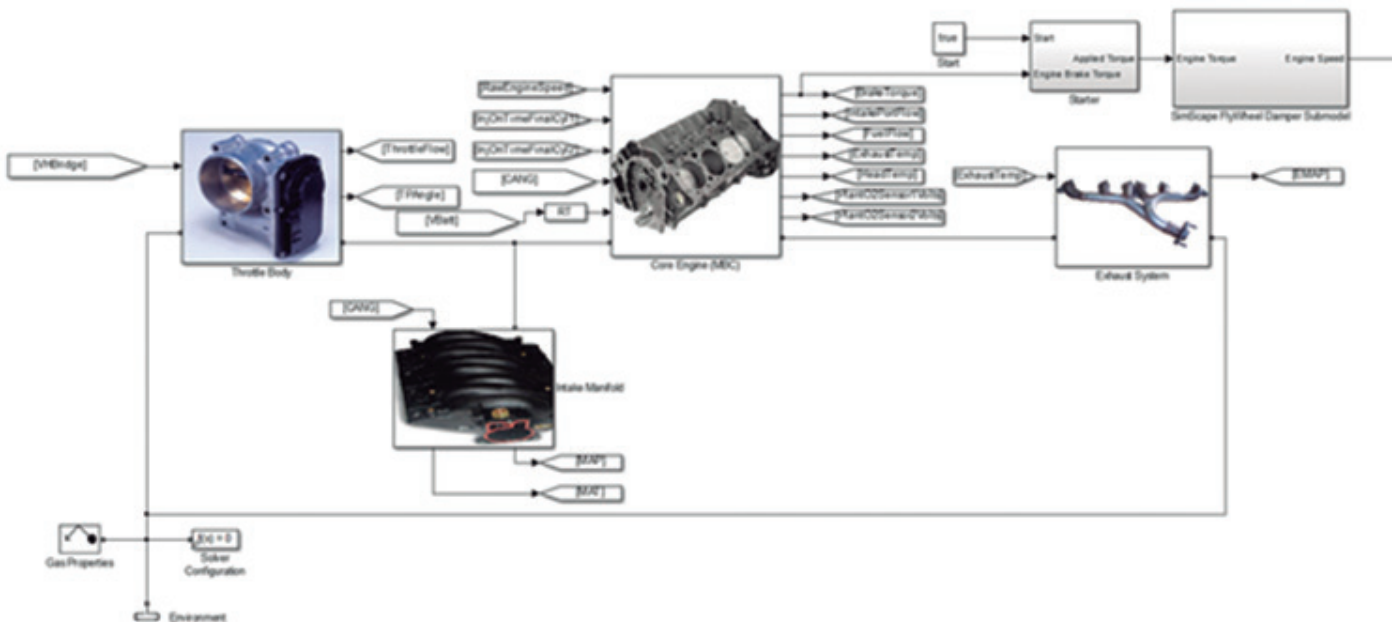


Figura 6. Modelo de planta del motor compuesto por elementos de Simscape y Model-Based Calibration Toolbox.

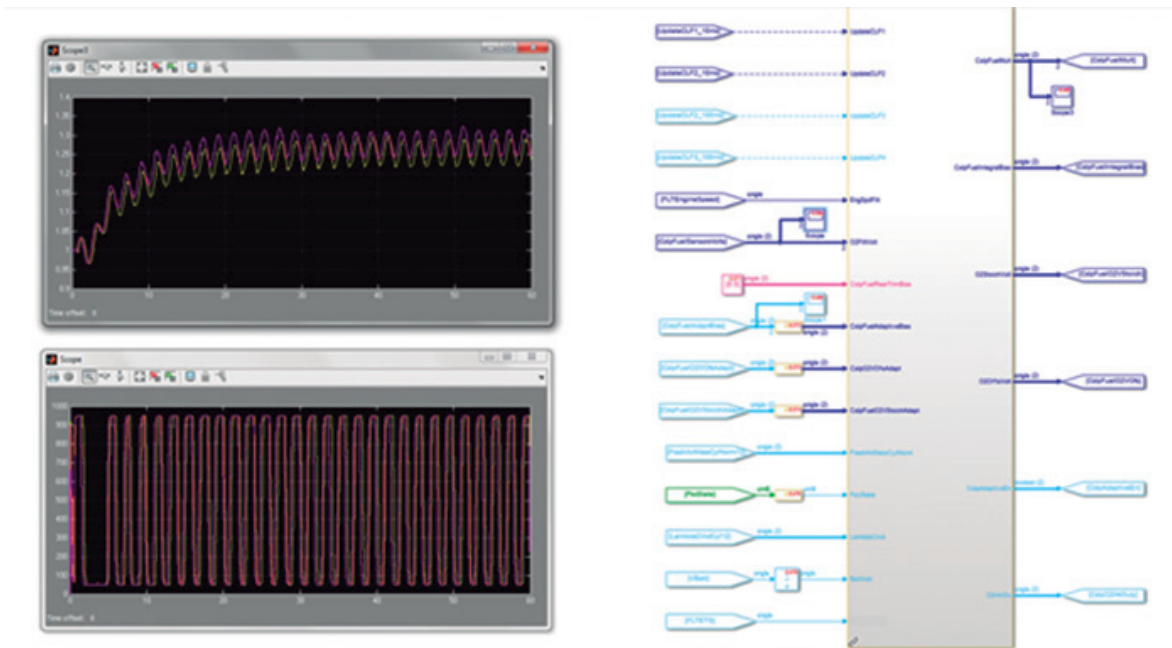


Figura 7. Simulación de control de AFR de bucle cerrado correspondiente a la habilitación del controlador seguida por la conmutación del sensor de oxígeno resultante de la corrección del multiplicador del ancho de pulso en lazo cerrado. Señal de AFR enviada 0,5 Hz, amplitud de AFR 0,5.

El modelo de planta, que incluía un submodelo de tabla de búsqueda de las características del sensor de oxígeno de conmutación mostradas en la Figura 3, nos permitió realizar iteraciones rápidas en nuestro diseño antes de la implementación.

Tras verificar la funcionalidad del controlador a través de estas simulaciones de nivel de sistema para la habilitación del sensor de oxígeno y el control de lazo cerrado (Figura 7), utilizamos Embedded Coder® con objeto de generar código para el procesador embebido de la ECU Pi Innovo M220.

Después de la realización de pruebas HIL (hardware-in-the-loop) para comprobar el rendimiento de la ECU en tiempo real, validamos el sistema de control de la AFR en la cámara de pruebas dinámicas del motor en situaciones de régimen estacionario y dinámicas, tras lo cual se llevó a cabo la verificación en el vehículo.

Verificamos en el banco de emisiones dinámico que la ECU Pi Innovo M220 controlaba la AFR de inyección para realizar un seguimiento de las proporciones medias aire-combustible deseadas y, además, que podíamos cambiar la frecuencia, la amplitud y el descentramiento de la AFR de escape

a voluntad. Con esta capacidad, la eficiencia del catalizador se puede optimizar directamente mediante la ejecución de pruebas de barrido a fin de producir una tabla de velocidad/carga que establezca la frecuencia, la amplitud y la desviación de la AFR del TWC óptimas de acuerdo con los puntos de funcionamiento de velocidad y carga del motor.

El enfoque del control de AFR basado en periodos permite una calibración de la eficiencia catalítica mucho más rápida y sencilla que el enfoque tradicional de ajustar iterativamente las ganancias proporcionales e integrales a fin de producir de forma indirecta la frecuencia y la amplitud deseadas.


Productos utilizados

- Simulink
- Embedded Coder

- Model-Based Calibration Toolbox
- Simscape
- Stateflow

Acerca del autor

Pete Maloney es un Senior Principal Technical Consultant con 24 años de experiencia industrial en desarrollo, diseño y calibración avanzados de sistemas de control para motores.

Pete preside la Powertrain Control and Calibration World Congress Session, además de copresidir el Comité de Control y Calibración (Control and Calibration Committee) de la Sociedad de Ingenieros Técnicos en Automoción (SAE). Cuenta con una Licenciatura en Ingeniería Mecánica de la Texas Tech University y un Máster en Ingeniería Mecánica del Massachusetts Institute of Technology. 

REFERENCIAS

- Heywood, John B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, p. 656, 1988.
- *Ibid.*, p. 302.
- J. Meyer, S. Yurkovich y S. Midlam-Mohler, "Architectures for Phase Variation Compensation in AFR Control", 2010 American Control Conference, Marriott Waterfront, Baltimore, MD (EE. UU.), 30 de junio-2 de julio de 2010.