La teoría de la información y el diagnóstico técnico

J. Rodríguez Matienzo
Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería Mecánica,
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*, La Habana 19390, Cuba.
E-mail mecanica@cujae.ispjae.edu.cu

(Recibido el 19 de abril de 1997; aceptado el 5 de mayo de 1997)

Resumen

Se brindan algunos aspectos esenciales de la Teoría de la Información aplicada a los problemas del Diagnóstico Técnico, en especial a la valoración de la informatividad de los parámetros de diagnóstico de los componentes de un objeto complejo. Los resultados del análisis de este factor sirven en la estructuración de los sistemas de diagnóstico técnico y en la selección, dado un conjunto de parámetros de diagnóstico válidos desde otros puntos de vista, del más informativo.

1. Introducción

Dentro de las tareas a resolver en el Diagnóstico Técnico, una gran parte está relacionada con la selección de los parámetros de diagnóstico (PD). Habitualmente, para ello se emplean diferentes criterios como son los de sensibilidad del PD al cambio del estado técnico, su estabilidad y linealidad, entre otros. El estudio del cumplimiento de los requisitos anteriores y de otros adicionales se ejecuta normalmente mediante el análisis estadístico tradicional que comprende las técnicas de comparación de muestras, análisis de varianzas, entre otros. Sin embargo, hay cuestiones que frecuentemente no encuentran respuesta por estos métodos, por ejemplo las concernientes a la comparación de varios PD entre sí para seleccionar el más adecuado, cuando todos satisfacen en mayor o menor medida los requisitos planteados; o la correspondiente a seleccionar qué parte del equipo debe ser objeto de diagnóstico, de forma tal que su estado refleje el estado del equipo en cuestión. En estos casos las herramientas estadísticas pueden resultar insuficientes y puede jugar un papel importante el empleo de la Teoría de la Información.

2. Nociones de teoría de la información

La teoría de la información se desarrolla aceleradamente con el incremento de los volúmenes de intercambio de información y el empleo creciente de técnicas informáticas. Los primeros reportes de su empleo en el diagnóstico técnico se remontan a los años 60, y se concretan en varios trabajos publicados en los años 80 [2, 3, 4].

Al descomponer un objeto de diagnóstico en partes más simples se debe tener en cuenta que el análisis de estas partes por separado brinde suficiente información sobre el estado técnico del objeto, sobre todo si se desea evaluar el estado del objeto a través del control de sus componentes.

El estado técnico del objeto es una *fuente de información* de carácter discreto. La *informatividad* de un parámetro de diagnóstico sobre el estado técnico se puede evaluar a partir de la disminución de la *indeterminación* que sobre dicho estado técnico existe después de conocido el valor que toma dicho parámetro. En otras palabras, al evaluarlo disminuye la *entropía* de la información, a partir de un valor inicial de dicha entropía.

Según SHANNON [1] la medida de la *indeterminación* de la elección por una fuente U de uno de sus estados posibles se cuantifica por:

$$H(U) = -C\sum_{i=1}^{N} p(u_i)\log_2 p(u_i) \tag{1}$$

donde C es un número arbitrario, generalmente 1 y $p(u_i)$ es la probabilidad del estado i. La base 2 es para obtener el resultado en *bits*, aunque es válido el empleo de otra base para los logaritmos. Esta expresión guarda semejanza con la de la de la entropía de un sistema físico propuesta por BOLTZMANN, de ahí su nombre. Para estados binarios, como el caso del estado técnico se tendrá que $H(U)$ varía entre 0 y 1 y es 1 para estados equiprobables, como se observa en la Fig. 1.

Para dos estados u_1 y u_2 la probabilidad del primero será $p(u_1)$ y la del segundo $p(u_2) = 1 - p(u_1)$. $H(U)$ será entonces:

$$H(U) = -[\, p(u_1)\log_2 p(u_1) + (1 - p(u_1))\log_2 (1 - p(u_1))\,] \tag{2}$$

y su variación en función de $p(u_1)$ se da en el esquema de la Fig. 1.

La información sobre el estado de la fuente se obtiene mediante elementos de información u_i. Para el caso sería el conocimiento del estado en que se encuentra el objeto, por ejemplo mediante el valor de sus parámetros estructurales. Pero se da el caso en que estos no se conocen directamente, sino que se reciben otros elementos de información w_j procedentes de la misma fuente y relacionados con u_i dígase los valores de los parámetros de diagnóstico relacionados supuestamente con los parámetros estructurales. En este caso se dice que la fuente está formada por dos fuentes de información unidas y estadísticamente dependientes U y W. Al obtener el valor concreto del parámetro w_j se disminuye la indeterminación sobre el estado de la fuente en la medida [1]:

$$H_{w_j}(U) = -\sum_{i=1}^{N} p(u_i/w_j)\log_2\ p(u_i/w_j) \quad (3)$$

donde $p(u_i/w_j)$ es la probabilidad condicional de que u_i tome cierto valor dado w_j.
La información que se obtiene por cada valor de w_j recibido es:

$$I(U) = H(U) - H_{w_j}(U) \quad (4)$$

La información media del conjunto de parámetros u_i sobre el estado de la fuente se obtiene por:

$$I(U) = H(U) - H_w(U) \quad (5)$$

$$H_W(Z) = \sum_{j=1}^{N} p(w_j)H_{w_j}(Z) \quad (6)$$

La evaluación de las probabilidades implicadas en las expresiones anteriores depende de los objetivos. Uno de los enfoques posibles se muestra a continuación.

3. Análisis de un objeto complejo a partir de sus componentes

Al efectuar la comprobación del estado técnico de un objeto, que previamente se ha descompuesto en partes más simples para su estudio, se concluye que el resultado es positivo C_1 (1) o negativo C_2 (0). Para estados binarios como los así definidos, la entropía inicial se halla por [4]:

$$H_0(C) = -P(C_1)\log_2 P(C_1) - P(C_0)\log_2 P(C_0) \quad (7)$$

donde $P(C_1)$ es la probabilidad de trabajo sin fallo de todos los componentes del objeto.

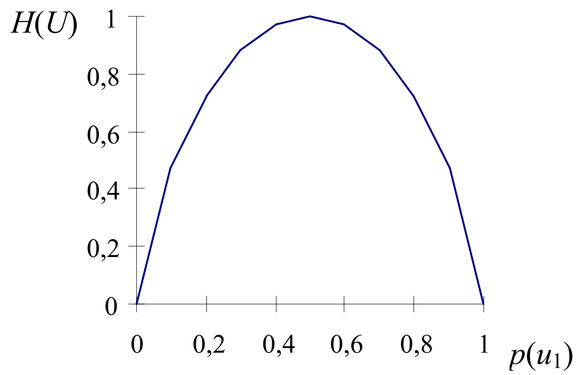

Fig. 1 Entropía de la información de una fuente discreta.

Teniendo en cuenta la probabilidad de trabajo sin fallo de los componentes independientemente se tendría:

$$P(C_1) = \prod_{j=1}^{M} P_j = P \quad (8)$$

donde M es la cantidad de componentes del objeto y P_j es la probabilidad de trabajo sin fallos de cada componente.

Las pruebas elementales que se le realizan al objeto o sus componentes consisten en la medición de un conjunto de uno o varios parámetros de diagnóstico. Cada prueba puede tener dos resultados, positivo z_{i1} o negativo z_{i0} ,que corresponden con las probabilidades $P(z_{i1})$, $P(z_{i0})$.
Entonces la entropía después de efectuada la prueba es:

$$H_{z_i}(C) = P(z_{i1})H_{z_{i1}}(C) + P(z_{i0})H_{z_{i0}}(C) \quad (9)$$

donde $H_{z_{i0}}(C)$ es la entropía de la indeterminación del estado C que queda después de que por el parámetro z_i se estableció que éste se encuentra fuera de los límites admisibles;
$H_{z_{i1}}(C)$ es la entropía correspondiente a cuando se establece que C está en los límites.

Para las comprobaciones del estado técnico se tendrá que $H_{z_{i0}}(C)$ es 0, pues al definirse el estado del objeto no hay ninguna indeterminación sobre el estado técnico. Se puede demostrar [4] que $H_{z_{i1}}(C)$ se evalúa por $H_0(M_n)$, que es la entropía de la parte de los componentes del objeto a este nivel que no se evalúa por z_i . $H_0(M_n)$ se determina por:

$$H_0(M_n) = -\prod_{j\in M_n} P_j \log_2 \prod_{j\in M_n} P_j - \left(1 - \prod_{j\in M_n} P_j\right)\log_2\left(1 - \prod_{j\in M_n} P_j\right) \quad (10)$$

donde $\prod_{j\in M_n} P_j$ se obtiene a partir de la probabilidad de trabajo sin fallos de los componentes no evaluados por el parámetro z_i.

Finalmente, la informatividad del parámetro z_i viene dada por

$$I_{z_i}(C) = H_0(C) - \prod_{j\in M_e} P_j H_0(M_n) \tag{11}$$

donde $\prod_{j\in M_e} P_j$ se obtiene a partir de la probabilidad de trabajo sin fallos de los componentes evaluados por el parámetro z_i.

El procedimiento planteado permite conocer, dada una descomposición del objeto en componentes más simples, cuáles son los componentes más informativos sobre el estado técnico y por lo tanto dirigir la atención priorizadamente hacia estos.

Otra propiedad de un parámetro de diagnóstico es la *amplitud del control del estado técnico* V_z [4] que expresa cómo la información del parámetro influye sobre la entropía que deja en el objeto por los componentes que no evalúa. Se obtiene como:

$$V_z = \frac{I_z}{H_0(M_n)} \tag{12}$$

A partir de las expresiones anteriores (7-12) se realizó un estudio para una propuesta de sistema de diagnóstico técnico para motores Diesel de locomotoras, en la cual el motor como objeto de diagnóstico se divide en tres sistemas, y estos a su vez en subsistemas:

1. Sistema de formación de la mezcla y combustión (suministro de combustible, suministro de aire y conductos).
2. Sistema de partes móviles en contacto (mecanismo de distribución, conjunto cilindro-pistón y cojinetes del cigüeñal).
3. Sistemas auxiliares de trabajo (sistema de lubricación, sistema de enfriamiento y sistema de control de la velocidad).

Un estudio de los fallos en 37 locomotoras durante un año (1995) permitió evaluar la información que cada uno de los sistemas y subsistemas es capaz de brindar sobre el estado técnico del motor, en otras palabras, cuál de ellos refleja en mayor medida dicho estado técnico. Los resultados se dan en la Tabla 1.

Tabla 1 Información brindada por sistemas y subsistemas de motores de locomotoras (primera parte)

Subsistemas	P_j	I_z	Sistemas	P_j	I_z
Suministro de combustible	0,500	0,00208	Formación de la mezcla y combustión	0,375	0,263
Suministro de aire	0,350	0,00304			
Conductos	0,391	0,00269			
Cojinetes del cigüeñal	0,510	0,00208	Partes móviles en contacto	0,636	0,116
Grupo cilindro-pistón	0,452	0,00235			
Mecanismo de distribución	--	--			
Lubricación	0,505	0,00208	Sistemas auxiliares	0,668	0,103
Enfriamiento	0,631	0,00155			
Gobernador	0,388	0,00275			

Tabla 2 Información brindada por sistemas y subsistemas de motores de locomotoras (segunda parte)

Subsistemas	$H_0(M_n)$	V_z	Sistemas	$H_0(M_n)$	V_z
Suministro de combustible	0,0358	0,058	Formación de la mezcla y combustión	0,9836	0,267
Suministro de aire	0,0484	0,062			
Conductos	0,0442	0,060			
Cojinetes del cigüeñal	0,0358	0,058	Partes móviles en contacto	0,8120	0,142
Grupo cilindro-pistón	0,0390	0,060			
Mecanismo de distribución	--	--			
Lubricación	0,0368	0,058	Sistemas auxiliares	0,7925	0,103
Enfriamiento	0,0292	0,053			
Gobernador	0,0444	0,061			

En el período analizado no se reportaron fallos por el mecanismo de distribución. La entropía inicial del sistema es de 0,6325 bits para los sistemas y de 0,0199 bits para los subsistemas. La diferencia se debe a que al estar dividido en partes más simples, la indeterminación inicial de la información disminuye.

Los valores de la amplitud del control y la entropía remanente están dadas en la Tabla 2.

Analizando estos resultados se observa que, en el caso de los sistemas, especial atención se le debe prestar al de formación de la mezcla y combustión, pues es el que mejor describe el estado del motor. En los subsistemas, los resultados apuntan hacia el de suministro de aire, o sea el turbocompresor. Esto quiere decir que al diagnosticar el estado del motor, la atención debe centrarse en estos componentes, pues son los fundamentales en la definición del estado técnico del mismo.

4. Selección de parámetros de diagnóstico

Como parte del mismo trabajo se realizaron mediciones de vibración en el bloque de cilindros del motor para diagnosticar el estado del grupo cilindro-pistón. Se tomaron como muestra dos motores: uno recién sometido a reparación general y otro con 200 000 km recorridos, que representan cerca del 60% de lo necesario para dicha reparación. Se realizaron más de 15 mediciones en conjunto para ambos motores en cada cilindro. Luego de un análisis de los resultados se observó que las frecuencias del espectro en que se manifestaban incrementos en el nivel de la aceleración de la vibración comparando ambos motores eran las siguientes:

Cilindro 1 incremento en las bandas de 2050 Hz, 2300 Hz, 3750 Hz, 4000 Hz y Nivel total.
Cilindro 2 incremento en las bandas de 2050 Hz, 3537 Hz y Nivel total.
Cilindro 3 incremento en las bandas de 2100 Hz, 4575 Hz y 3700 Hz y Nivel total.
Cilindro 4 incremento en las bandas de 812 Hz, 2062 Hz y 3562 Hz y Nivel total
Cilindro 5 incremento en las bandas de 625 Hz, 1900 Hz y Nivel total
Cilindro 6 incremento en las bandas de 687 Hz, 2100 Hz y 3750 Hz y Nivel total

La cuestión es decidir si todos o algunos de estos grupos de frecuencias realmente diferencian mediante el nivel de vibración en las mismas, a cuál motor corresponden. El análisis es el siguiente.

Antes de realizar la medición de las vibraciones, la indeterminación del estado del motor se calcula para $p(u_1) = p(u_0) = 0,5$, donde 1 y 0 son el estado satisfactorio y no satisfactorio, por lo que la entropía inicial tal como se ha dicho es $H_0 = 1$. Con cada medición w_j realizada se disminuye la entropía en la magnitud dada por (3), donde $p(u_i/w_j)$ es la probabilidad de que dado un valor de w_j se tenga un estado u_i. Dado que se tienen mediciones de w_j para cada uno de los estados u_i (los dos motores con recorridos diferentes), se obtiene a partir de estas mediciones la función de densidad de probabilidad $f(w_j/u_i)$ y a partir de estas según el Teorema de BAYES [3] se calcula $p(u_i/w_j)$ por:

$$p(u_i / w_j) = \frac{p(u_i) f(w_j / u_i)}{\sum_{i=1}^{k} p(u_i) f(w_j / u_i)} \qquad (13)$$

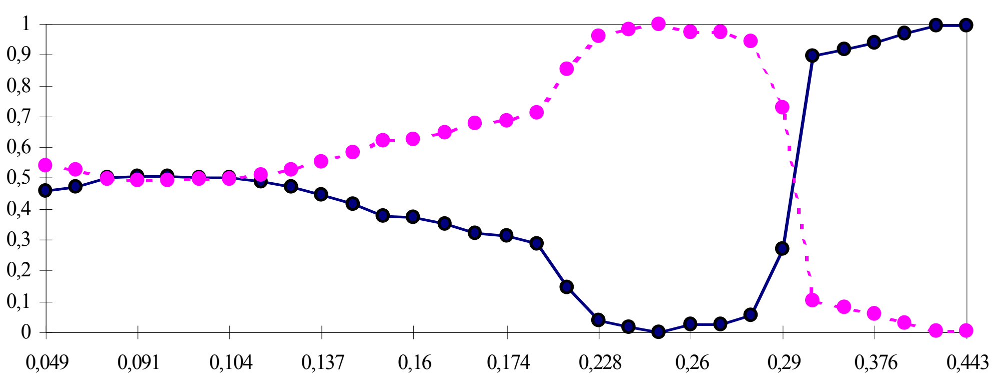

Fig. 2 Informatividad de la vibración en la banda de frecuencias 2000-2200 Hz.

Previamente se procesaron las mediciones y se ajustaron a una función de distribución de probabilidad conocida. Después de probar con la distribución normal, la log-normal y otras resultó ser la más adecuada en todos los casos la distribución normal. Lo anterior se validó mediante el test de KOLMOGOROV-SMIRNOV, siendo el ajuste como es lógico mejor en unos casos que en otros.

Evaluando la función de densidad para el rango de valores medidos se obtiene $p(u_i/w_j)$, luego se evalúa (3) y posteriormente (4).

Los resultados de las mediciones en los cilindros de ambos motores se aprecian gráficamente en la Fig. 2. Se observa la variación de la informatividad (línea continua) y la entropía remanente (línea discontinua) del parámetro nivel de vibración en la banda de 2000-2200 Hz de las mediciones en los cilindros.

Para el estado 0 (motor con 200 000 km) la media de los valores es 0,367, con una desviación estándar σ€= 0,155 y para el estado 1 (motor de reparación general) los valores son 0,144 y σ€= 0,068. Un análisis estadístico normal hubiera dado que las medias de ambas muestras de valores son estadísticamente diferentes, pero el análisis de la información brinda más resultados.

Considerando que la información es válida si es mayor de 0,9 bits (elimina el 90% de la entropía inicial) se observa que este parámetro diferencia el estado 0 del 1 solo si es mayor de 0,360. Los valores menores se puede decir que poseen baja información sobre el estado, o sea por los mismos no se puede diferenciar un motor del otro. Resultados similares se presentan en el resto de los grupos considerados.

Este análisis puede complementar a los habitualmente realizados para obtener los niveles de referencia o patrones para el diagnóstico, tanto por vibraciones como por otros métodos.

5. Conclusiones

La teoría de la información puede aplicarse en la selección de componentes a diagnosticar en objetos complejos.

La informatividad del parámetro de diagnóstico permite elegir entre un conjunto de posibles parámetros a los más "informativos" y se agrega a lista de propiedades valiosas para el diagnóstico.

Bibliografía

1 DMÍTRIEV V. I. *Teoría de la información aplicada*. Mir, Moscú, 1991.

2 LEBIN M. I. , OBOZOV A.A. Diagnóstico de los motores Diesel: Aspectos de la información (I), *Dvigatelestroenie*, 1986, N°5, 41-46.

3 LEBIN M. I. , OBOZOV A.A. Diagnóstico de los motores Diesel: Aspectos de la información (II), *Dvigatelestroenie*, 1986, N°9, 35-37.

4 PUCHKAREB I. , PAJONOB E. *Control y evaluación del estado técnico de las locomotoras*. Transport, Moscú, 1985.

Information theory and technical diagnostics

Abstract

Some essential aspects of Information Theory applied to the solution of problems in Technical Diagnostics are given, specially for the valuation of informativeness of diagnostic parameters of components of complex objects. Results of the analysis of this factor are useful in the structural synthesis of technical diagnostic systems, as well as in the selection of most informative parameter from a set of diagnostic parameters valuable from other points of view.