

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP LMD TRONG ĐÁNH GIÁ TÌNH TRẠNG KỸ THUẬT HỘP SỐ CƠ KHÍ

APPLICATION OF LMD METHOD IN ASSESSING TECHNICAL CONDITION OF MECHANICAL GEARBOX

Lê Đức Hiếu^{1,*}, Đinh Quốc Cường²

¹Trường Cơ khí – Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Viện Nghiên cứu Cơ khí

TÓM TẮT

Phương pháp phân tích tín hiệu rung động LMD là một phương pháp mới trong xử lý các tín hiệu phi tuyến và không ổn định. Trong bài báo này, phương pháp LMD kết hợp với en-trô-pi năng lượng (EN) được ứng dụng trong phân tích các tín hiệu rung động và đánh giá tình trạng làm việc của hộp số cơ khí. Các tín hiệu rung động được phân tích thành các thành phần PFs bởi phương pháp LMD. Sau đó, từ một số thành phần PFs đầu tiên được chọn làm các véc-tơ đặc tính hư hỏng trội nhất của các thành phần trong hộp số, từ các véc-tơ này được sắp xếp lại và tính giá trị năng lượng để phân tích, đánh giá tình trạng kỹ thuật của hộp số. Kết quả cho thấy phương pháp LMD kết hợp với EN đã đánh giá được tình trạng làm việc của hộp số một cách hiệu quả và chính xác cao khi được so sánh với các phương pháp khác như EMD và EN.

Từ khóa: Hộp số cơ khí; Chẩn đoán lỗi; Phương pháp LMD.

ABSTRACT

LMD vibration signal analysis method is a new method in processing nonlinear and unstable signals. In this paper, the LMD method combined with energy entropy (EN) is applied to analyze vibration signals and evaluate the working condition of mechanical gearbox. The vibrated signals are decomposed into PFs components by the LMD method. Then from the first some PFs components are selected as the most dominant damage characteristic vectors of the components in the gearbox, from these vectors are rearranged and the energy value is calculated to be divided for evaluation. Technical condition of the gearbox. The results show that the LMD method combined with EN can effectively and accurately evaluate the working condition of the gearbox when compared with other methods such as EMD and EN.

Keywords: Mechanical gearbox; Fault diagnosis; LMD method.

1. TỔNG QUAN

Hộp số là phần không thể thiếu trong các hệ thống truyền động cơ khí nói chung và trong hệ thống truyền động của các phương tiện vận tải nói riêng. Trong quá trình khai thác, các chi tiết bị hao mòn, xuất hiện các hư hỏng không mong muốn, như hư hỏng các cặp bánh răng, ổ bi, các tín hiệu rung động của hộp số cơ khí có đặc tính không ổn định, phi tuyến. Vì vậy, việc xác định các dạng hư hỏng của các chi tiết trong hộp số cơ khí là rất cần thiết. Đã có nhiều công bố về chẩn đoán hư hỏng của hộp số cơ khí đăng trên các tạp chí uy tín [1-7].

Có nhiều phương pháp trong chẩn đoán hư hỏng của hộp số: phân tích tín hiệu âm thanh, đánh giá chất lượng hộp số thông qua chất lượng của dầu bôi trơn (giám sát các hạt kim loại bị mài mòn trong dầu bôi trơn) và phân tích tín hiệu rung động [5]. Trong đó, phương pháp tín hiệu rung động đang được sử dụng nhiều hơn các phương pháp còn lại. Trong phân tích tín hiệu rung động, thường được sử dụng các phương pháp: xử lý tín hiệu trong miền thời gian, xử lý tín hiệu trong miền tần số, và xử lý tín hiệu trong miền thời gian – tần số. Trong bài báo này sử dụng phương pháp phân tích tín hiệu trong miền thời gian – tần số để phân tích tín hiệu rung động của hộp số. Trong miền thời gian – tần số đã có những nghiên cứu như: biến đổi nhanh Fourier, phân bố Wigner-Ville và phân tích Wavelet [8], EMD (Empirical Mode Decomposition), EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) [5-7]. Nhưng các phương pháp đó có nhiều hạn chế như: chỉ áp dụng cho các tín hiệu tuyến tính, không phải là phương pháp xử lý tín hiệu tự thích nghi. Hơn nữa, các tín hiệu rung động của hộp số cơ khí lại chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố phi tuyến: tải trọng, khe hở, ma sát, độ cứng bề mặt... Tóm lại, trong điều kiện làm việc tổng quát, các tín

hiệu rung động của hộp giảm tốc là không ổn định, phi tuyến nên việc xác định các điều kiện làm việc của hộp số cơ khí gặp nhiều khó khăn khi sử dụng các phương pháp truyền thống. Chính vì vậy, một phương pháp phân tích tín hiệu mới LMD (Local Mean Decomposition) được giới thiệu trong bài báo này giúp chúng ta giải quyết được những hạn chế của các phương pháp truyền thống. LMD là phương pháp được phát triển bởi Smith [9], các tín hiệu được phân rã thành các PFs khắc phục được nhược điểm về nhiễu của phương pháp EMD và EEMD.

Bài báo ứng dụng phương pháp LMD trong xử lý tín hiệu rung động của hộp số cơ khí. Đầu tiên, tín hiệu rung động được phân tích bởi LMD thành các PFs, sau đó sử dụng en-trô-pi năng lượng để trích xuất đặc tính hư hỏng của từng chi tiết của hộp số (hư hỏng cặp bánh răng, hư hỏng của vòng bi). Các giá trị en-trô-pi năng lượng của các thành phần khác nhau sẽ khác nhau ở các dải tần khác nhau trong quá trình hoạt động của hộp số cơ khí. Kết quả cho thấy phương pháp LMD cho kết quả phân tích tín hiệu rung động của hộp số cơ khí vượt trội hơn các phương pháp EMD và EEMD.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp LMD

Phương pháp LMD là một phương pháp phân tích tín hiệu trong miền thời gian – tần số tự thích nghi, phù hợp để xử lý các tín hiệu rung động được điều chế biên tần (AM – FM). Phương pháp này được S. Smith phát triển để phân tích bất kỳ tín hiệu phi tuyến và không ổn định $y(t)$ nào đó thành các thành phần hàm tích (PFs) và một hàm đơn điệu u_k .

Phương pháp LMD được xử lý theo các bước sau:



• Một: Tính toán giá trị trung bình m_i của hai cực trị liên tiếp n_i và n_{i+1} :

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \quad (1)$$

• Hai: Vẽ tất cả các giá trị trung bình m_i của hai cực trị liên tiếp bằng đường thẳng;

• Ba: Tính toán dao động cực bộ của mỗi nửa sóng theo công thức:

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \quad (2)$$

• Bốn: Tính giá trị $h_{11}(t)$ của tín hiệu: $h_{11}(t) = y(t) - m_{11}(t)$ (4)

• Năm: Tính tần số sau điều chế của tín hiệu: $s_{11}(t) = h_{11}(t)/a_{11}(t)$ (4)

Từ phương trình (1) đến (4), ta có:

$$\begin{cases} h_{11}(t) = y(t) - m_{11}(t) \\ h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t) \\ \vdots \\ h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t) \end{cases} \quad (5)$$

• Sáu: Tính giá trị $a_1(t)$ theo công thức sau:

$$a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)a_{13}(t) \dots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t) \quad (6)$$

$$\text{Trong đó: } \lim_{n \rightarrow \infty} a_{1n}(t) = 1 \quad (7)$$

• Bảy: Xác định pha tức thời (IP) và tần số tức thời (IF) theo công thức (8), (9):

$$\varphi_1(t) = \arccos(s_{1n}(t)) \quad (8)$$

$$f_1(t) = \frac{f_s d\varphi_1(t)}{2\pi dt} \quad (9)$$

Thành phần PF_1 đầu tiên được xác định theo công thức (10):

$$PF_1(t) = a_1(t) \cdot s_{11}(t) \quad (10)$$

Từ công thức (1) đến (7), ta có:

$$\begin{cases} u_1(t) = y(t) - PF_1(t) \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t) \\ \vdots \\ u_\tau(t) = u_{(\tau-1)}(t) - PF_\tau(t) \end{cases} \quad (11)$$

Trong phương trình (11), $u_1(t)$ là tín hiệu dao động mới, toàn bộ quy trình được lặp lại τ lần cho đến khi $u_\tau(t)$ là một hàm đơn điệu.

• Cuối cùng, tín hiệu $y(t)$ được phân tích thành τ PFs và một hàm đơn điệu $u_\tau(t)$:

$$y(t) = \sum_{p=1}^{\tau} PF_p(t) + u_\tau(t) \quad (12)$$

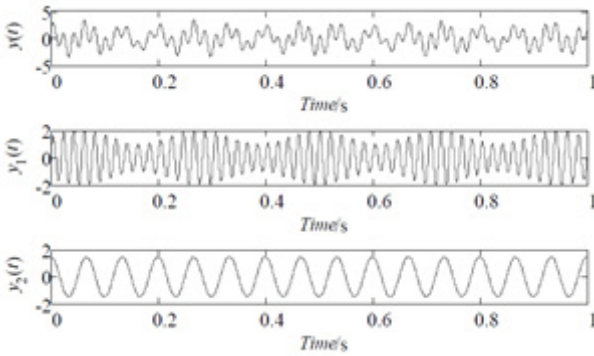
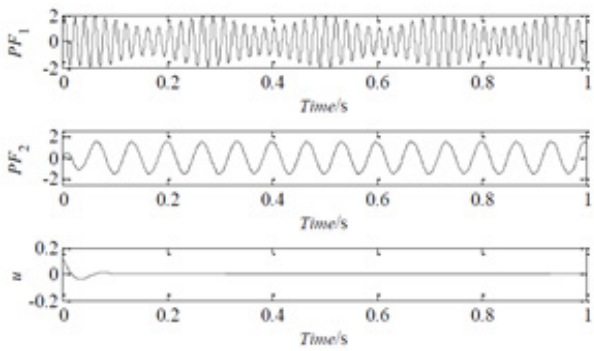
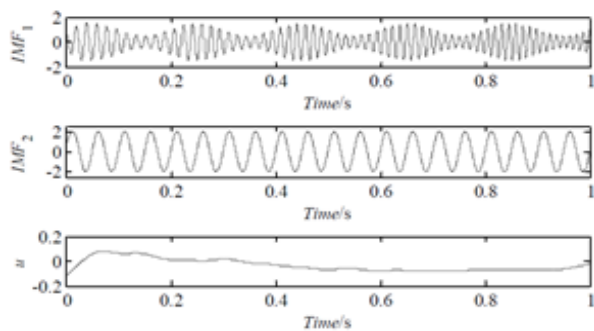
Để chứng minh phương pháp LMD xử lý được các dạng tín hiệu khác nhau, giả thiết có tín hiệu $y(t)$ gồm $y_1(t)$ và $y_2(t)$, như sau:

$$y_1(t) = (1.5 + 0.5\sin(9\pi t))\sin(100\pi t + \sin(5\pi t)) \quad (13)$$

$$y_2(t) = 1.5\cos(30\pi t) \quad (14)$$

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (15)$$

Dạng tín hiệu gốc và sau khi xử lý bằng phương pháp LMD thể hiện như Hình 1 và Hình 2:


 Hình 1. Dạng tín hiệu $y(t)$.

 Hình 2. Kết quả phân tích tín hiệu $y(t)$ bằng LMD.

 Hình 3. Kết quả phân tích tín hiệu $y(t)$ bằng EMD.

2.2. Phương pháp en-trô-pi năng lượng

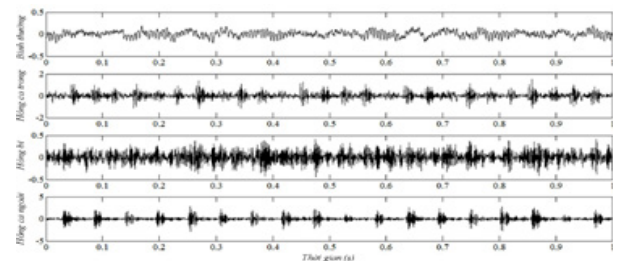
Khi hộp giảm tốc đang hoạt động với các hư hỏng khác nhau, thì các thành phần tần số cộng hưởng tương ứng được tạo ra trong các tín hiệu rung động, và ở đó năng lượng của tín hiệu rung động thay đổi với sự phân bố tần số. Để minh họa cho trường hợp thay đổi này như đề cập ở trên, phương pháp en-trô-pi năng

lượng LMD được trình bày trong bài báo này. Nếu n PFs và một phần dư u_n được tìm ra bởi phương pháp LMD để phân tích tín hiệu rung động $y(t)$ của vòng bi, ở đó năng lượng của n PFs theo thứ tự lần lượt là $E_1, E_2, \dots, E_n$. Sau đó, theo tính trực giao của sự phân tích LMD, tổng năng lượng của n PFs bằng tổng năng lượng của tín hiệu gốc $y(t)$ khi phần dư u_n được bỏ qua. Khi đó, các PFs $c_1, c_2, \dots, c_n$ bao gồm các thành phần tần số khác nhau, $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, tạo nên sự phân bố năng lượng trong miền tần số của tín hiệu rung động hộp số cơ khí. En-trô-pi năng lượng LMD tương ứng được định nghĩa như sau:

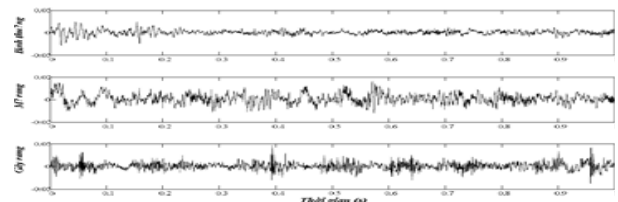
$$H_{EN} = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (16)$$

Trong đó, $p_i = E_i/E$ là tỉ lệ phần trăm năng lượng của c_i trong toàn bộ năng lượng E ($E = E_1 + E_2 + \dots + E_n$).

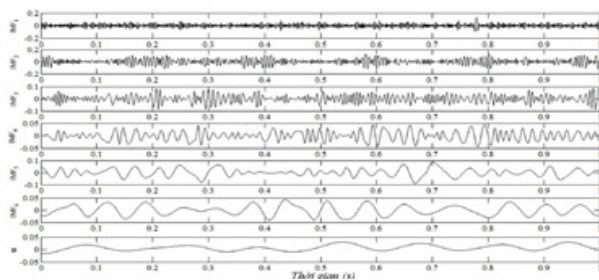
Tín hiệu rung động của hộp số cơ khí thể hiện qua các tín hiệu đo được từ các vòng bi, cặp bánh răng như Hình 4a, Hình 4b. Hình 5 là kết quả phân tích tín hiệu rung động của hộp số bằng phương pháp LMD.



Hình 4a. Dạng hư hỏng của vòng bi.



Hình 4b. Dạng hư hỏng của bánh răng.



Hình 5. Kết quả phân tích tín hiệu rung động của vòng bi bằng LMD khi hỏng ca trong.

Các en-trô-pi năng lượng LMD có giá trị như Bảng 1 và Bảng 2:

Bảng 1. En-trô-pi năng lượng LMD của các dạng hư hỏng vòng bi

Bình thường	Hỏng ca ngoài	Hỏng bi	Hỏng ca trong
1,9453	1,3718	1,2814	1,1545

Bảng 2. En-trô-pi năng lượng LMD của các dạng hư hỏng bánh răng

Bình thường	Mẻ răng	Gãy răng
2,2375	1,8286	1,4698

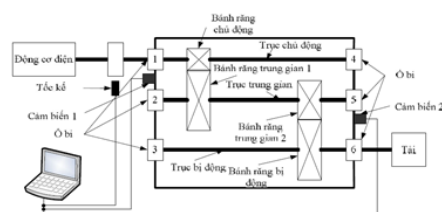
Theo Bảng 1 và Bảng 2, en-trô-pi năng lượng trong trường hợp vòng bi và bánh răng ở trạng thái bình thường là lớn nhất so với các trường hợp còn lại vì khi có hư hỏng xảy ra ở vòng bi hoặc bánh răng, thì các thành phần tần số cộng hưởng tương ứng được tạo ra, do đó, en-trô-pi năng lượng có thể giảm bởi vì năng lượng phân bố chủ yếu trong dải tần cộng hưởng và đặc biệt là ở dải tần cộng hưởng cao thì mức độ ảnh hưởng còn nghiêm trọng hơn. Tóm lại, năng lượng tập trung vào vào dải tần số cộng hưởng nhiều hơn và en-trô-pi năng lượng lúc đấy là nhỏ nhất. Từ việc phân tích trên cơ sở en-trô-pi năng lượng bằng phương pháp LMD phản ánh được tình trạng làm việc và các loại hư hỏng của hộp số cơ khí. Vì vậy,

việc phân tích, đánh giá điều kiện làm việc của hộp số bằng LMD kết hợp với xác định en-trô-pi năng lượng phù hợp để đánh giá tình trạng kỹ thuật của hộp số cơ khí nói riêng và các máy chuyển động qua nói chung.

3. ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP LMD-EN TRONG ĐÁNH GIÁ TÌNH TRẠNG KỸ THUẬT HỘP SỐ CƠ KHÍ

3.1. Thu thập dữ liệu

Sơ đồ thí nghiệm mô tả như Hình 6, số liệu được lấy ra từ hai cảm biến gắn trên vỏ hộp số tại các tần số 30, 35, 40, 45 và 50 Hz ở các tải trọng thấp và cao với tần số lấy mẫu $f_s = 200/3$ kHz, các bước lấy mẫu được lặp lại bốn lần. Tốc kế tạo ra 10 xung cho mỗi vòng quay của trục chủ động có độ chính xác cao, các dữ liệu được lấy mẫu đồng bộ từ hai cảm biến (cảm biến 1 và cảm biến 2) [10]. Các kết quả đo được lưu lại dưới dạng *.text, và dùng tia la-de để tạo ra các hư hỏng trên bề mặt chi tiết. Trong bài báo này, các cặp bánh răng răng thẳng được chọn làm đối tượng chẩn đoán ở ba trạng thái: bình thường, mẻ răng và gãy răng với tần số lấy mẫu 2048 Hz. Với mỗi trạng thái có 24 tín hiệu rung động chia thành 10 nhóm được chọn ngẫu nhiên làm mẫu để thử nghiệm. Bộ dữ liệu thí nghiệm của vòng bi được lấy theo các điều kiện: bình thường, hỏng ca trong, hỏng bi, và hỏng ca ngoài. Với mỗi điều kiện lấy được 60 tín hiệu rung động và trong 20 nhóm lấy ngẫu nhiên ra bộ dữ liệu đầu vào cho phương pháp LMD-EN.



Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm

3.2. Phương pháp đánh giá tình trạng kỹ thuật hộp số cơ khí LMD-EN

Đầu tiên, sau khi các tín hiệu gốc được phân tích thành các PFs bởi phương pháp LMD, tám hoặc sáu PFs đầu tiên chứa thông tin hư hỏng chiếm ưu thế nhất được chọn và được sắp

xếp từ cao đến thấp từ $c_1, c_2, \dots, c_8$; tiếp theo từ các công thức (8), (10) và (14), ta tìm được véc-tơ đặc tính hư hỏng T' . Để thấy rõ hơn hiệu quả của phương pháp LMD-EN trong xử lý các tín hiệu rung động, trong bài báo này LMD-EN được so sánh với phương pháp phân tích EMD-EN. Kết quả xem trong Bảng 3 và Bảng 4.

Bảng 3. Kết quả đánh giá tình trạng hư hỏng vòng bi theo LMD-EN

Tín hiệu	Phương pháp xử lý	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
Bình thường	LMD-EN	0,9368	0,3438	0,1635	0,1356	0,0932	0,0570
	EMD-EN	0,7749	0,4667	0,3521	0,2467	0,2213	0,2069
Hỏng ca trong	LMD-EN	0,9556	0,3268	0,0619	0,0250	0,0082	0,0037
	EMD-EN	0,7865	0,4365	0,3675	0,2660	0,0619	0,0180
Hỏng bi	LMD-EN	0,9476	0,2856	0,1279	0,0235	0,0090	0,0035
	EMD-EN	0,6870	0,3562	0,2098	0,1309	0,0575	0,0098
Hỏng ca ngoài	LMD-EN	0,9538	0,2687	0,1570	0,0697	0,0338	0,0230
	EMD-EN	0,6038	0,4515	0,4621	0,3578	0,2680	0,2119

Bảng 4. Kết quả đánh giá tình trạng hư hỏng bánh răng theo LMD-EN

Tín hiệu	Phương pháp xử lý	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
Bình thường	LMD-EN	0,9235	0,3482	0,1670	0,1307	0,0896	0,0573	0,0388	0,0325
	EMD-EN	0,6849	0,4737	0,3550	0,2691	0,2101	0,1992	0,1958	0,1692
Mẻ răng	LMD-EN	0,9483	0,3498	0,0610	0,0269	0,0089	0,0047	0,0029	0,0025
	EMD-EN	0,7835	0,4356	0,3875	0,2560	0,0579	0,0158	0,0078	0,0065
Gãy răng	LMD-EN	0,9525	0,2478	0,1517	0,0719	0,0257	0,0212	0,0095	0,0018
	EMD-EN	0,5756	0,4611	0,4418	0,3534	0,2748	0,2185	0,0687	0,0635



Hai phương pháp LMD hoặc EMD dùng để xử lý các tín hiệu rung động nhằm đánh giá tình trạng kỹ thuật của hộp số cơ khí. Theo Bảng 3 và Bảng 4 có thể thấy rằng phương pháp LMD-EN tốt hơn phương pháp EMD-EN, độ chính xác trung bình của phương pháp LMD-EN đạt 96,70%, bởi vì phương pháp EMD-EN không xử lý triệt để nhiễu tác động trong quá trình xử lý tín hiệu. Mặt khác, phương pháp LMD là một quá trình tự thích nghi theo bản thân tín hiệu, quá trình phân tích tín hiệu của nó phụ thuộc vào thông tin thay đổi của tín hiệu và do đó nó nhạy hơn với các dạng hư hỏng của hộp số.

4. KẾT LUẬN

Do đặc tính không ổn định của các tín hiệu hư hỏng hộp số cơ khí, một phương pháp chẩn đoán tình trạng kỹ thuật dựa trên phương pháp LMD-EN đã được trình bày trong bài báo này. Đầu tiên, LMD được sử dụng để xử lý trước các tín hiệu rung động khác nhau. Sau đó, do tình trạng làm việc của hộp số thay đổi, en-trô-pi năng lượng LMD cũng thay đổi, điều này cho thấy rằng năng lượng của mỗi thành phần tần số thay đổi khi hộp số làm việc với mỗi một hư hỏng khác nhau. Do đó, năng lượng của mỗi thành phần PF được lấy làm đặc tính để đánh giá tình trạng làm việc của hộp số. Từ việc phân tích lý thuyết và các kết quả thực nghiệm, có thể kết luận rằng:

(1) LMD là một phương pháp xử lý tín hiệu tự điều chỉnh có thể được áp dụng cho các quá trình phi tuyến và không ổn định.

(2) Sự kết hợp của LMD và en-trô-pi năng lượng (EN) đã giúp cho việc đánh giá thành công tình trạng làm việc và các dạng hư hỏng của các bộ phận của hộp số cơ khí.

(3) Phương pháp LMD-EN có khả năng nhận dạng và phân loại hư hỏng của hộp số cơ khí (độ chính xác trung bình 96,70%) cao hơn

so với phương pháp EMD-EN (độ chính xác trung bình 85,6%).❖

Ngày nhận bài: **18/5/2024**

Ngày phản biện: **06/6/2024**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. E.B. Halim, M.A.A. Shoukat Choudhury, S.L. Shah, M.J. Zuo, "Time domain averaging across all scales: A novel method for detection of gearbox faults", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, Pp. 261-278, 2008.
- [2]. P.D. McFadden, "Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration", Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 108, Pp. 165-170, 1986.
- [3]. S.J. Loutridis, "Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition", Engineering Structures, Vol. 26, Pp. 1833-1841, 2004.
- [4]. J. Cheng, D. Yu, J. Tang, Y. Yang, "Application of frequency family separation method based upon EMD and local Hilbert energy spectrum method to gear fault diagnosis", Mechanism and Machine Theory, Vol. 43, Pp. 712-723, 2008.
- [5]. N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proceedings of the Royal Society of London", Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 454, Pp. 903-995, 1998.
- [6]. C. Junsheng, Y. Dejie, Y. Yu, "Research on the intrinsic mode function (IMF) criterion in EMD method", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, Pp. 817-824, 2006.
- [7]. C. Junsheng, Y. Dejie, Y. Yu, "The application of energy operator demodulation approach based on EMD in machinery fault diagnosis", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, Pp. 668-677, 2007.
- [8]. N.G. Nikolaou, I.A. Antoniadis, "Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets", NDT & E International, 35 (2002) 197-205.
- [9]. J.S. Smith, "The local mean decomposition and its application to EEG perception data", Journal of the Royal Society Interface, 2, Pp. 443-454, 2005.
- [10]. P. Society, Data Analysis Competition, in, 2009.