

文章编号:1671-8879(2009)04-0097-04

EDM 在汽车制动力数据平滑处理中的应用

郭兰英¹, 梁 波¹, 赵祥模¹, 董安国²

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了实现对汽车制动力变化的全过程检测,提高系统的检测精度和重复性,提出了将经验模态分解(EMD)方法用于汽车制动力数据的平滑处理中,并与传统的汽车制动力数据平滑处理方法的最小二乘法 and 样条函数法进行了仿真与实测对比试验。试验结果表明:EMD 方法既能够削弱干扰的影响,提高测量曲线的光滑度,使汽车制动力测量的最大偏差从原来的 0.67% 降到 0.16%,又能够保持原有曲线的变化特征,从而保证了系统的检测精度和检测数据的重复性。

关键词:汽车工程;制动性能;数据平滑处理;经验模态分解

中图分类号:U467.4 **文献标志码:**A

Application of empirical mode decomposition (EMD) in data smoothing for vehicle braking

GUO Lan-ying¹, LIANG Bo¹, ZHAO Xiang-mo¹, DONG An-guo²

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to achieve the detection of variation of vehicle brake in whole course, and improve system precision and repetition, EMD is applied to data smoothing of vehicle braking. The proposed method is compared with traditional methods, such as least square method and spline function method, by simulation and actual measurement. The result shows that the proposed method can suppress disturbance and improve smoothing of measurement curve. The maximum deviation measurement of vehicle brake can be reduced from 0.67% to 0.16%, and the characteristics of initial curve can be maintained, so the detection precision and reuse of detection data can be ensured. 2 tabs, 3 figs, 10 refs.

Key words: automobile engineering; braking performance; data smoothing; EMD

0 引 言

汽车制动性能直接关系到行车安全,汽车制动性能的检测是机动车安全技术检测的重要内容之一。国家标准《机动车运行安全技术条件》颁布实施后,对汽车制动性能的检测提出了更高的要求,除了

要检测各轮最大制动力、阻滞力和驻车制动力等常用参数外,还要检测同轴左右轮制动力上升过程差、制动力协调时间和整车制动比等核心参数^[1-2]。同时,为了满足对汽车制动系统故障诊断的需要,还必须对整个制动力上升、保持及释放过程进行全面的测试。因此,在汽车制动性能的检测中,关键是对汽

收稿日期:2008-07-10

基金项目:陕西省科技攻关项目(99K11-G6)

作者简介:郭兰英(1963-),女,江苏江都人,副教授,工学硕士,E-mail:yguo@chd.edu.cn。

车制动力变化全过程的检测^[3]。通过对汽车制动力变化全过程数据的采集、处理和分析,求出反映汽车制动性能指标的各项参数,最终按国家标准对汽车制动性能进行评价。

在实际检测过程中,系统硬件会受到来自系统内部和外部的各种干扰,采集的数据中往往叠加有噪声。此类噪声分为两大类:一类为周期性的;另一类为随机性的^[4]。随机干扰的存在,使得采用离散数据绘制的曲线多呈折线形状,很不光滑,严重影响到各项指标的测试精度和评价结果的准确性^[5]。为了抑制随机干扰的影响,提高系统的测量精度,监测制动力曲线变化全过程,则需通过平滑处理消除噪声。为此,本文采用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法进行信号的平滑去噪处理,并将传统的制动力数据的平滑处理方法与 EMD 方法进行仿真与实测试验对比,表明 EMD 方法不仅能够消弱干扰,而且能够保持制动力曲线原有的特征。

1 传统的制动力数据平滑处理方法与 EMD 方法

1.1 传统的制动力数据平滑处理方法

目前,在汽车制动性能的检测系统中常用的数据平滑处理方法有:最小二乘法 and 样条函数法等。本文以一组实测的汽车制动力数据(表 1)为例,采用基于多项式的最小二乘法进行拟合,结果如图 1 所示。

表 1 汽车制动力与时间关系试验数据

时间/0.1 s	2.30	3.75	5.00	6.25	6.55	8.10	9.00	11.50	12.50	14.00	15.00	17.00
制动力/10 N	-40	25	-20	48	5	20	0	-55	10	-10	50	-80
时间/0.1 s	19.0	20.0	21.5	22.5	24.1	26.0	27.0	28.5	30.0	31.8	33.0	34.0
制动力/10 N	80	-38	55	10	40	-15	58	-20	70	-35	100	20
时间/0.1 s	36.0	37.0	38.0	39.5	42.0	44.8	47.2	48.2	49.1	51.0	52.5	54.0
制动力/10 N	55	25	27	75	50	900	745	760	640	650	595	645
时间/0.1 s	57.5	58.7	62.0	64.5	65.5	68.0	71.3	72.5	74.5	76.3	77.5	80.0
制动力/10 N	655	530	680	600	640	620	665	630	630	650	575	615
时间/0.1 s	80.8	81.2	81.4	82.5	84.0							
制动力/10 N	275	80	-50	-50	-120							

从图 1 可看出,由于汽车制动力曲线难以用任一函数 $f(x)$ 准确表达,虽然经过拟合后曲线变得平滑,但未能较好地反映制动力的变化过程,还丢失了重要的拐点特征数据,所以在实际应用中常采用三次样条函数对汽车制动力曲线进行拟合。

假定制动力实测数据的有限区间为 $[a, b]$, 将其

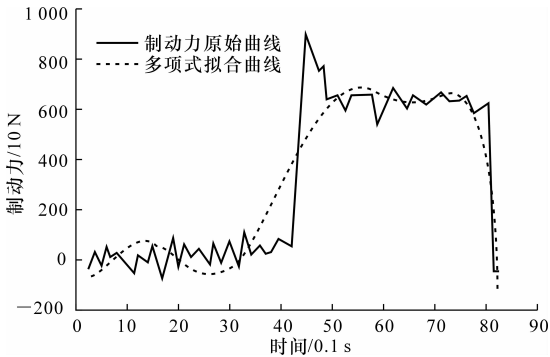


图 1 汽车制动力曲线的多项式拟合

分为 $N+1$ 段,具体的分划 Δ 为 $a = x_0 < x_1 < \cdots < x_{N+1} = b$,其中 $x_i (i = 0, 1, \cdots, N+1)$ 为采样点。加入新节点后,把分划 Δ 扩展为

$$x_{-n} < x_{-1} < a = x_0 < x_1 < \cdots < x_{N+1} = b < x_{N+2} < \cdots < x_{N+n+1} \tag{1}$$

由样条函数定义及定理知,对于样条函数 $\varphi_n(x, m) = (m-x)_+^n$,令变量 m 分别取 $x_{-n}, \cdots, x_{-1}, x_0, x_1, \cdots, x_{N+1}, x_{N+2}, \cdots, x_{N+n+1}$,则有

$$\varphi_n(x, x_{-n}), \cdots, \varphi_n(x, x_{-1}), \varphi_n(x, x_0), \varphi_n(x, x_1), \cdots, \varphi_n(x, x_{N+1}), \varphi_n(x, x_{N+2}), \cdots, \varphi_n(x, x_{N+n+1}) \tag{2}$$

都是 n 次样条函数。其中 $(m-x)_+^n$ 为阶幂函数,其定义为

$$(m+x)_+^n = \begin{cases} 0 & x > m \\ (m-x)^n & x \leq m \end{cases}$$

如在式(2)序列中,截取前 $N+n+1$ 个元素,则它们在区间 $[a, b]$ 上是线性无关的,并且构成 $S_n(\Delta)$ 的一组基底,其中 $S_n(\Delta)$ 是 n 次样条函数的全体。现在,要以 $N+2n+2$ 个 n 次样条函数的适当线性组合,构造具有局部严格正性的 $S_n(\Delta)$ 的基底。

函数 $f(x)$ 在点 $x_i, x_{i+1}, \cdots, x_{i+n+1}$ 的 $n+1$ 阶差商 $f[x_i, x_{i+1}, \cdots, x_{i+n+1}]$,可表示为 $f(x)$ 在点 $x_i, x_{i+1}, \cdots, x_{i+n+1}$ 的函数值的线性组合,即

$$f[x_i, x_{i+1}, \cdots, x_{i+n+1}] = \sum_{k=i}^{i+n+1} \frac{f(x_k)}{\omega_{n+1,i}(x_k)} \tag{3}$$

$i = -n, \cdots, N$

式中: $\omega_{n+1,i}(x_k) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{i+n+1} (x_k - x_j)$ 。

令 $\{x_j\}$ 是节点序列,函数 $(x_{i+n+1} - x_i)\varphi_n(x, m)$ 关于节点 $x_i, x_{i+1}, \cdots, x_{i+n+1}$ 的 $n+1$ 阶差商为

$$B_{i,n}(x) = (x_{i+n+1} - x_i)\varphi_n[x, x_i, \cdots, x_{i+n+1}] \tag{4}$$

$i = -n, \cdots, N$

根据式(3)及 $\varphi_n(x, m)$ 的定义,由式(4)可得

$$B_{i,n}(x) = (x_{i+n+1} - x_i) \sum_{k=i}^{i+n+1} \frac{(x_k - x)_+^n}{\omega_{n+1,i}(x_k)} \tag{5}$$

称 $B_{i,n}(x)$ 为 n 次 B 样条函数或 B 样条函数,常用 $B_i(x)$ 代替 $B_{i,n}(x)$ 。正如大多数高次样条函数容易出现龙格现象,高于三次的 B 样条曲线在计算几何中一般不用。为了便于计算机编程,实际应用最多的三次 B 样条曲线表达式为^[6]

$$B_3(t) = \sum_{i=0}^3 F_{i,3}(t)b_i \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (6)$$

式中: b_i 为 n 次 B 样条曲线的特征多边形顶点; $F_{i,3}(t)$ 为三次 B 样条曲线的基函数,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} F_{0,3}(t) &= (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1)/6 \\ F_{1,3}(t) &= (3t^3 - 6t^2 + 4)/6 \\ F_{2,3}(t) &= (-3t^3 + 3t^2 - 3t + 1)/6 \\ F_{3,3}(t) &= t^3/6 \end{aligned} \right\} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (7)$$

根据式(7),由式(6)可得三次 B 样条曲线表达式为

$$\begin{aligned} B_3(t) &= F_{0,3}(t)b_0 + F_{1,3}(t)b_1 + F_{2,3}(t)b_2 + \\ &F_{3,3}(t)b_3 = [(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1)b_0 + \\ &(3t^3 - 6t^2 + 4)b_1 + (-3t^3 + 3t^2 - 3t + 1) \cdot \\ &b_2 + t^3b_3]/6 \quad 0 \leq t \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

将表 1 汽车制动力试验数据代入式(8),作为拟合函数,拟合曲线如图 2 所示。拟合曲线虽然比较光滑,与原数据的近似也较好,但由于区间节点过多,曲线不够理想,如果人为减少某拟合区间节点数,那么逼近函数对原始数据的近似性将受到影响。

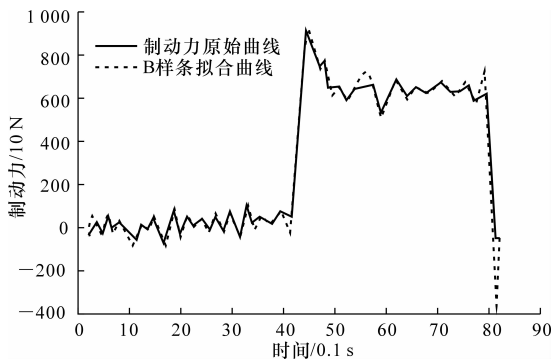


图 2 汽车制动力曲线 B 样条函数拟合

1.2 EMD 方法

EMD 方法是由美籍华人 Huang 提出的信号时频分析的一种全新方法,突破了传统信号处理的思想,在工程领域得到了广泛的应用。EMD 方法能够实现对非平稳非线性信号的时频分析、滤波等处理。这种方法不再认为信号的基本组成是正弦信号,而是一种本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF),因此可以将信号中的各阶 IMF 分解出来^[7]。分解结果是任何信号都是若干阶 IMF 和一个残余量的和,每一阶 IMF 都反映了信号动态特性,而残

余量反映了信号的偏移量或稳态值。IMF 需要满足 2 个条件^[8]:① 整个数据集的极大值、极小值的数目和穿越零点的次数要相等或最多相差 1;② 极大值点确定的上包络线和极小值确定的下包络线的均值要始终为 0。根据这 2 个条件,EMD 方法的处理步骤如下所述。

(1) 对于分解信号 $y(t)$,找出 $y(t)$ 上所有的极值点,用三次样条曲线连接所有极大值点,形成 $y(t)$ 的上包络线;连接所有极小值点,形成 $y(t)$ 的下包络线。定义上、下包络线的均值为 $m_1(t)$, $y(t)$ 与 $m_1(t)$ 的一次迭代差值 $h_1^1(t) = y(t) - m_1(t)$ 。

(2) 如果 $h_1^1(t)$ 不满足 IMF 的 2 个条件,则令 $y(t) = h_1^1(t)$,然后重复步骤(1),得到二次迭代差值 $h_1^2(t)$,直到经过 k 次迭代得到 $h_1^k(t)$ 满足 IMF 的 2 个条件为止。定义分解信号 $y(t)$ 的第一阶 IMF 分量 $C_1(t) = h_1^k(t)$ 。

(3) 设信号 $r_1(t) = y(t) - C_1(t)$,令新的信号 $y(t) = r_1(t)$,重复步骤(1)、(2),得到二阶分量 $C_2(t)$;再令 $r_2(t) = y(t) - C_2(t)$ 作为新的信号 $y(t)$,按此方法继续分解,直至标准方差 S_D ^[9] 为 0.2 ~ 0.3。

$$S_D = \sum_{i=0}^T \left[\frac{(h_1^{i-1}(t) - h_1^i(t))^2}{(h_1^{i-1}(t))^2} \right]$$

式中: t 为采样时间; T 为采样时段。

若 $r_n(t)$ 已经成为单调函数,这样 $y(t)$ 可以表示成各阶 IMF 与一个残余量 $r_n(t)$ 的和,即

$$y(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t)$$

对表 1 汽车制动力试验数据,采用 EMD 方法进行平滑处理,仿真结果如图 3 所示。

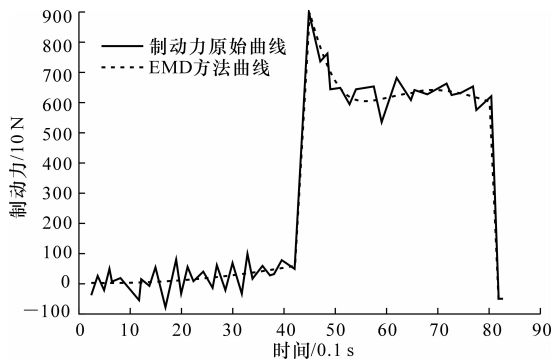


图 3 EMD 平滑处理结果

从图 3 可以看出,利用 EMD 方法进行平滑处理去噪,不仅消弱了干扰,而且保持了汽车制动力曲线原有的特征^[10]。

2 实际信号试验

在制动力测量试验台上,车辆通过使用大小不同的制动力,可分别从测量仪表和工控机上得到 6 组试验数据,重复试验 5 次,取其均值作为测量值。再采用 EMD 算法进行数据处理,重复以上过程,得到试验数据(表 2)。30 次的对比试验,最大偏差从原来的 0.67%下降到 0.16%。

表 2 汽车制动力对比试验结果

试验组号	测量仪表 显示的制 动力/N	未采用 EMD 方法的制动 力/N	偏差/ %	采用 EMD 方法的制 动力/N	偏差/ %
1	1 950	1 962.8	0.66	1 953.2	0.16
2	1 960	1 971.8	0.60	1 958.3	0.09
3	1 970	1 983.2	0.67	1 971.9	0.10
4	1 980	1 982.0	0.61	1 984.9	0.15
5	1 990	2 002.4	0.62	1 988.5	0.08
6	2 000	2 011.4	0.57	2 002.6	0.13

3 结 语

(1)从汽车制动力对比试验结果可看出,采用 EMD 方法对采集的制动力数据进行处理,是一种进行信号滤波去噪、平滑数据的有效方法,也是目前提取短数据序列趋势的最好方法;从 30 次的对比试验数据可以看出,最大偏差仅为 0.16%。

(2)为了进一步研究 EMD 方法在汽车制动力数据处理中的应用,一是采集更多车型的制动力数据进行 EMD 分解;二是对 EMD 分解的边缘效应进行深入研究,找到更加简单、有效的端点判定方法,减小边缘效应对制动力数据的影响。

参考文献:

References:

[1] 吴晓东,李 冰,赵学增.差动制动对汽车制动稳定性的影响[J].交通运输工程学报,2008,8(1):23-26.
WU Xiao-dong,LI Bing,ZHAO Xue-zeng. Effect of differential brake on braking stability of automobile [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(1):23-26.

[2] 赵 伟,魏 朗,杜 峰.基于横摆力矩的汽车制动稳定性模糊控制[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(6):76-80.
ZHAO Wei,WEI Lang,DU Feng. Fuzzy control of automobile braking stability based on yaw moment control[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2008,28(6):76-80.

[3] 赵祥模,南春丽,马 建,等.汽车制动性能检测中的制动力数据拟合与优化方法研究[J].中国公路学报,2003,16(3):100-104.
ZHAO Xiang-mo,NAN Chun-li,MA Jian,et al. Study of braking data quasi-harmony and optimization method in auto brake function test [J]. China Journal of Highway and Transport,2003,16(3):100-104.

[4] James A C. Foundations of digital signal processing and data analysis [M]. New York: Macmillan Pub,1997.

[5] 朱肖强.基于 CAN 总线的汽车制动试验台数据采集系统的研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.

[6] 滕 鹏,黄 俊,张 斌.三维航迹的 B 样条曲线拟合算法[J].火力与指挥控制,2007,32(9):115-118.
TENG Peng,HUANG Jun,ZHANG Bin. Study on the three-dimensional trajectory optimization by using the method of B-spline curve fitting[J]. Fire Control and Command Control,2007,32(9):115-118.

[7] 王 春,彭东林. Hilbert-Huang 变换及其在去噪方面的应用[J].仪器仪表学报,2004,25(增刊):42-45.
WANG Chun,PENG Dong-lin. The Hilbert-Huang transform and its application on signal de-noising[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2004,25(S): 42-45.

[8] Huang N E,Shen Z,Long S R. A new view of nonlinear water waves;the Hilbert spectrum[J]. Annual Review Fluid Mechanics,1999,31:417-457.

[9] 孙 璐.运动车辆随机荷载及其激励下的地面动力响应的理论研究[D].南京:东南大学,1996.

[10] Huang N E,Shen Z,Long S R,et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceeding of Royal Society,1998,454:903-995.