

泵车排量检测的极值增量 DFA 方法*

江星星¹, 李舜韶¹, 李世勋², 王勇¹, 程春¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院 南京, 210016)

(2. 北汽福田汽车股份有限公司北京福田雷萨泵送机械分公司 北京, 101400)

摘要 混凝土泵车排量计量精度与效率的提升是解决泵车运行状态监测、施工管理和施工质量以及泵车性能评价等问题的关键。首先, 提出基于去趋势波动分析(detrended fluctuation analysis, 简称 DFA) 排量检测法, 分析泵车液压泵体振动信号, 提取标度指数; 其次, 利用标度指数标定泵车排量进而实现排量计量。分析结果验证了该方法可行但精度有待提高。为此在 DFA 法基础上提出了基于极值增量 DFA 排量检测法, 获取标度律曲线上最小尺度波动参数和最大尺度波动参数, 再使用尺度参数标定排量实现排量计量。试验结果表明, 极值增量检测法较 DFA 检测法使排量标定精度提高了近 3 倍, 为泵车排量计量提供了一种新的手段。

关键词 振动信号; 极值点; 排量; 去趋势波动分析; 增量序列

中图分类号 TP277; TU641; TH814

引言

在混凝土泵送施工中, 混凝土的搅拌和泵送通常在相距较远的两地进行, 需使用泵车排量计量系统来解决施工方与用户之间的信息不对称问题。此外泵车运行状态监测、施工管理和质量及泵车性能评价等方面也存在对排量计量系统的需求。泵送排量计量已成为一项亟待解决的工程技术问题^[1]。

早期排量计量研究, 如测定泵送压力与不同配合比混凝土摩擦阻力间的关系, 转动流量测量混凝土塑性黏度估算泵送阻力等, 但未实现高效排量计量。当前主要使用的计量方法有: 开关传感器计量方法^[2]; 主液压泵排油量计量方法^[3]; 实测吸入容积效率计量方法^[4]; 压力和位移的计量方法等^[1]。基于开关传感器计量方法的泵送效率选取依靠操作人员的经验, 难以真实反映泵送情况; 基于主液压泵排油量计量方法的主液压泵容积效率和混凝土缸的容积效率也需靠经验设定; 基于实测吸入容积效率计量方法较前两种方法测量精度高但必须有专门测量管道, 同时增加成本; 基于压力和位移的计量方法的测量精度较高, 但混凝土缸内压力测量难度大, 测量传感器工作条件恶劣, 易损坏。从现有技术来看, 还需新的计量方法进一步提升排量计量精度。

振动信号作为泵车不同状态下的一种载体, 往往表现为复杂的非平稳性、混沌和分形等非线性特征^[5]。通过检测出各状态的特征参数, 然后利用其标定排量, 即可实现排量的计量。另外从实际操作来看, 使用振动信号测量排量可以极大地降低排量测量难度、提高测量可靠性。问题的关键在于选取何种特征参数(特征参数要准确可靠地区分排量)。

DFA 分析法是一种量化非平稳时间序列标度指数的方法。此方法广泛应用于众多学科, 如基因序列分析^[6]、气候监测^[7]、金融时间序列^[8]及故障诊断等领域。它可以有效地滤除非平稳时间序列在各个尺度下的波动趋势, 去除信号干扰成分^[9], 且对噪声影响不敏感。此外该方法可以揭示系统内部存在的长程相关性, 反映出时间序列的内部动力学机制, 客观量化信号的复杂特性。为此可以根据 DFA 法的量化标度指数来对不同事物进行分类。

1 DFA 方法

振动信号的时间序列 $x(i)$ 执行 DFA 过程如下。

1) 首先构造一个去均值求和序列 $\tilde{x}(i)$

$$\tilde{x}(i) = \sum_{j=1}^i (x(j) - [x]) \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目(50675099); 机械结构与振动国家重点实验室开放课题资助项目(SV2015-KF-01); 中央高校基础研究基金资助项目(NZ2015103)

收稿日期: 2014-03-11; 修回日期: 2014-04-26

$$[x] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i) \quad (2)$$

2) 将去均值求和序列 $\tilde{x}(i)$ 按照长度 n 等分为 K 段不重叠的数据, 每段数据记为 $\tilde{x}_k(i) (k=1, 2, \dots, K; i=1, 2, \dots, n)$ 。

3) 采用最小二乘法拟合各段数据的多项式趋势, 得到的趋势项记为 $L_n(i), i=1, 2, \dots, N$ 。

4) 计算时间序列 $\tilde{x}(i)$ 的均方根波动函数 $F(n)$

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\tilde{x}(i) - L_n(i)]^2} \quad (3)$$

5) 改变尺度 n 的大小, 重复步骤 2~4。如果时间序列 $x(i)$ 具有自相似特征, 则当 n 在某个尺度范围内取值时, $F(n)$ 和 n 满足式(4)所示标度律关系

$$F(n) = n^\alpha \quad (4)$$

其中: 参数 α 为时间序列 $x(i)$ 的标度指数。

2 基于 DFA 的排量检测方法

泵车依靠液压泵输送混凝土, 液压泵体的振动信号可以反映泵送状态。考虑到在采集液压泵体信号时, 其表面不平整、空间狭窄等难以安装传感器, 但泵车分动箱与液压泵是一体, 且分动箱体安装空间充足、表面平整, 因此采用 DFA 分析分动箱体振动信号亦可准确地反映泵车工作状态。如图 1 所示, 加速度传感器粘贴在分动箱体上。振动加速度传感器为压电式三向加速度传感器, 型号为 DH311E, 频响范围 1~3 000 Hz、灵敏度 (x 轴 1.08, y 轴 1.04, z 轴 1.07, 单位为 $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$)、量程为 $5\,000(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。



图 1 传感器放置位置

Fig. 1 The placement of sensor

在采集能够代表泵车工作状态的振动数据之后, 利用 DFA 法获取标度指数对排量进行标定 (排量是指每分钟泵送混凝土体积), 标定流程如下:

1) 采集若干工作状态 (工作排量覆盖常用工作范围) 的振动数据;

2) 使用 DFA 法分析各状态下振动信号获得标度指数, 对同类状态信号的标度指数取均值;

3) 利用标度指数均值对排量进行标定, 形成排量对应的标度指数数据库, 然后在排量计量时查询数据库获取排量。

本研究使用的信号为北汽福田雷萨泵送机械厂 56 m 混凝土泵车常用 14, 25 MPa 两种泵送压力下 (泵车具有泵送压力显示功能) 5 个排量, 总共 10 种状态的振动数据 (实际应用该方法需泵送状态越多越精确)。每种状态测量 4 组数据。使用 LMS 采集系统采集数据, 其中一组状态的时域、频域信号如图 2 所示。信号主要能量集中在 1 024 Hz 以前, 为此信号采样频率设定为 2 048 Hz。为获得完整的泵送状态, 至少要包含两个以上的泵送过程, 因此采样时间设定为 5 s。图 3, 4 为 DFA 分析两种泵送压力下排量 1 状态的标度律曲线 (横坐标为尺因子 n 的对数, 纵坐标为均方根波动函数 $F(n)$ 的对数)。图 3, 4 所示的标度律曲线满足良好的幂律关系, 标度指数 α 属于 0~0.5 范围。表 1 为 DFA 分析各状态的标度指数值及标度指数值统计量。标度指数的均方差值较小且远小于其均值, 说明标度指数可以可靠地作为排量标定参数。

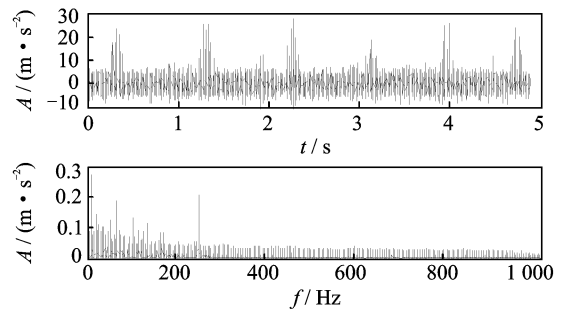


图 2 采用信号的时域、频域图

Fig. 2 Time and frequency result of the analyzed signal

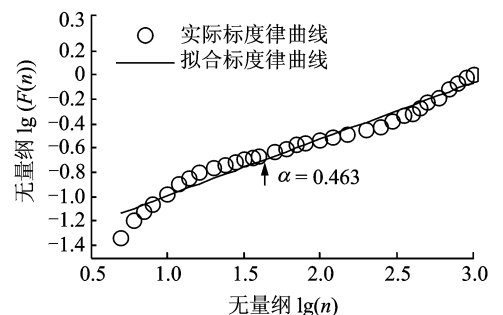


图 3 14 MPa 排量 1 状态下 DFA 法标度律曲线

Fig. 3 The power law curve by DFA under 14 MPa with discharge 1

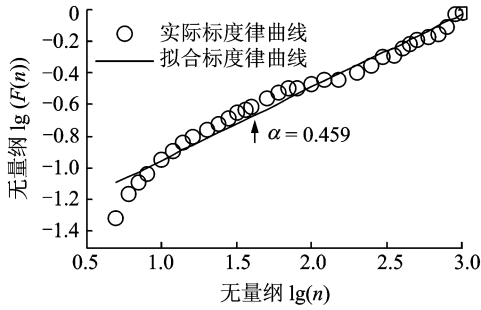


图 4 25 MPa 排量 1 状态下 DFA 法标度律曲线

Fig. 4 The power law curve by DFA under 25 MPa with discharge 1

表 1 DFA 法标度指数及统计量

Tab. 1 The scaling exponent obtained by DFA and its statistical parameter

压力/ MPa	排量	样本数据号				均值	均方差 $\times 10^{-3}$
		1	2	3	4		
14	1	0.470	0.474	0.468	0.463	0.469	5
	2	0.459	0.458	0.455	0.452	0.457	5
	3	0.452	0.445	0.448	0.453	0.450	4
	4	0.430	0.435	0.437	0.438	0.435	4
	5	0.428	0.422	0.425	0.426	0.425	2
25	1	0.446	0.452	0.463	0.459	0.455	7
	2	0.439	0.431	0.434	0.431	0.434	4
	3	0.424	0.423	0.425	0.428	0.425	2
	4	0.417	0.416	0.411	0.409	0.413	4
	5	0.402	0.405	0.402	0.405	0.404	2

如图 5~8 所示,各泵送状态下采用标度指数 α 标定排量的效果。图 5,7 所示,利用标度指数标定排量出现相近排量的标度指数重合现象,易造成标定失效。图 6,8 所示,采用标度指数均值标定排量,线性度较好,可区分相近排量。说明 DFA 法用于排量标定可行,但相近排量的标度指数值差距小,整个标定区间范围在 0.05 左右,对提高排量测量精度有一定影响。主要原因是 DFA 排量检测法是直接分析原始振动信号,而泵车振动信号中还存在诸多不稳定因素,引起标度指数波动,也易造成相近排量的标度指数出现重合,因此需改进 DFA 法以进一步提升排量标定精度。

3 极值增量 DFA 排量检测法

信号中的奇异点及不规则的突变部分通常包含比较丰富的状态信息^[10-11],分析奇异点背后的影响因素有助于揭示信号波动的内在驱动机制。奇异点包含过零点和极值点,但过零点易受扰动不稳定,奇异性分析一般采用极值点^[12]。文献[13-14]中验证

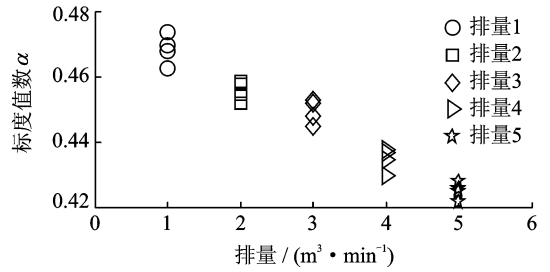


图 5 14 MPa 各排量下 DFA 法标度指数标定

Fig. 5 The scaling exponent obtained by DFA under 14 MPa

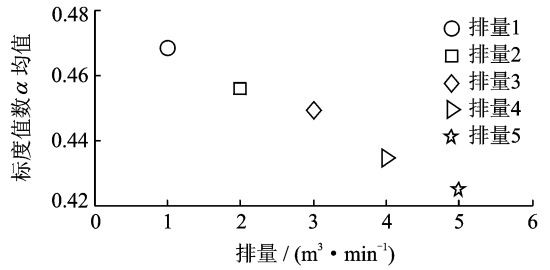


图 6 14 MPa 各排量下 DFA 法标度指数均值标定

Fig. 6 Mean value of scaling exponents obtained by DFA under 14 MPa

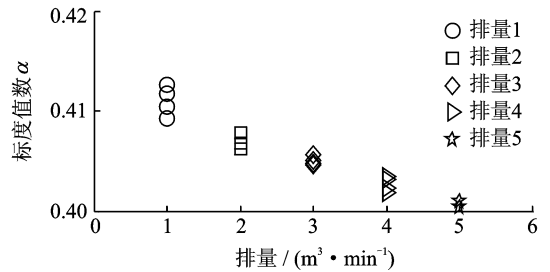


图 7 25 MPa 各排量下 DFA 法标度指数标定

Fig. 7 The scaling exponent obtained by DFA under 25 MPa

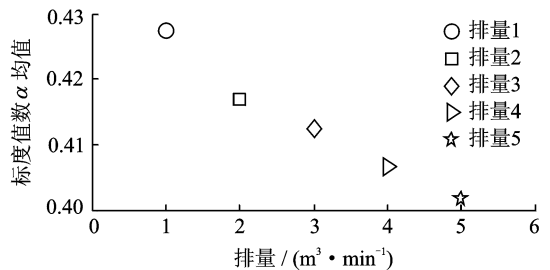


图 8 25 MPa 各排量下 DFA 法标度指数均值标定

Fig. 8 Mean value of scaling exponents obtained by DFA under 25 MPa

信号的增量序列比原序列更能突出系统的状态特征,为此提出极值增量 DFA 排量检测法。

通过时间序列 $x_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 的配分函数和两点相关函数建立增量序列和原序列之间的波动特征关系。时间序列的配分函数

$$Z_q(l) = [|x_{n+1} - x_n|^q] \quad (5)$$

其中： $[\cdot]$ 为期望； q 为矩指数。

如果时间序列 x_n 存在长相关性，则配分函数 $Z_q(l)$ 满足幂律特征

$$Z_q(l) = l^{\tau(q)} \quad (6)$$

$$\tau(q) = qH(q) + \tau(0) \quad (7)$$

其中： $H(q)$ 为广义 Hurst 指数。

如果 $\tau(q)$ 是 q 的线性函数，即 $H(q)$ 是个常数，则时间序列 x_n 是单重分形时间序列。否则，时间序列 x_n 为多重分形时间序列。

增量序列 Δx_n 的两点相关函数的定义为

$$C(l) = [(\Delta x_n) \cdot (\Delta x_{n+l})] \quad (8)$$

对于一个长程相关的平稳高斯时间序列， $C(l)$ 满足式(9)关系

$$C(l) = l^{-\gamma} \quad (9)$$

其中： $0 < \gamma < 1$ 。

当 $q=2$ ，式(5)可以变为

$$Z_2(l) = [|x_{n+1} - x_n|^2] \sim l^{2-\gamma} = l^{2\alpha} \quad (10)$$

其中：参数 α 为增量序列 Δx_n 的 DFA 标度指数； $Z_2(l)$ 为原时间序列 x_n 的配分函数。

式(10)说明增量序列与原时间序列之间具有内在联系。增量序列可以保留原序列的波动特性，说明其可以用来表示系统的动力学特征。

极值增量 DFA 泵车排量标定流程如下。

1) 对原始时间序列 x_i 取极值 \bar{x}_m

$$\bar{x}_m = x_{n+1} \quad (11)$$

其中： $x_n \leq x_{n+1}; x_{n+2} \leq x_{n+1}$ 或 $x_n \geq x_{n+1}; x_{n+2} \geq x_{n+1}$ 。

2) 求极值时间序列 \bar{x}_m 的增量 Δx_m

$$\Delta x_m = \bar{x}_{m+1} - \bar{x}_m \quad (12)$$

3) 增量 Δx_m 序列执行 DFA 过程。

4) 获取 Δx_m 序列标度律曲线的最小尺度波动参数和最大尺度波动参数。将尺度波动参数标定排量，形成排量对应的尺度波动参数数据库，在排量计量时查询数据库获取排量。

如图 9,10 所示，极值增量 DFA 标定排量使用与 DFA 标定相同的信号，得到标度律曲线。可以看出各排量标度律曲线具有良好的区分度。其中各状态最小、最大尺度波动参数差异性最显著，故选择它们作为排量标定的特征参数。

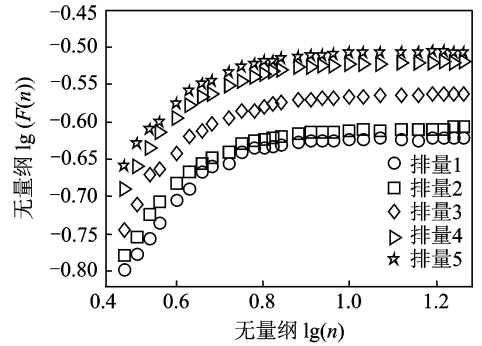


图 9 14 MPa 各排量下极值增量 DFA 法标度律曲线
Fig. 9 The power law curves of 14 MPa with DFA increment series of extreme point

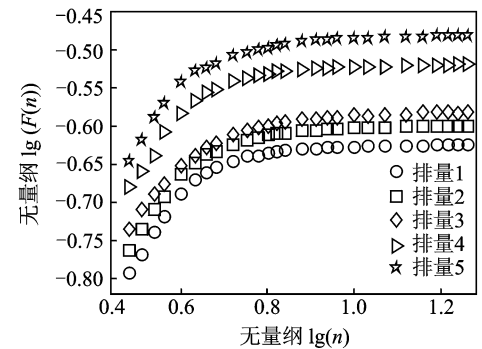


图 10 25 MPa 各排量下极值增量 DFA 法标度律曲线
Fig. 10 The power law curves of 25 MPa with DFA increment series of extreme point

表 2 为从标度律曲线上提取的最小尺度与最大尺度波动参数(排量后 1 和 2 标号分别对应各排量的最小尺度波动参数和最大尺度波动参数)。表 3 为尺度参数的统计量，可以看出尺度参数均方差值

表 2 极值增量 DFA 法各工作状态的尺度波动参数

Tab. 2 The scaling fluctuation value obtained by the DFA increment series of extreme point

工作压力/MPa	数据组	排量 1		排量 2		排量 3		排量 4		排量 5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
14	1	-0.797	-0.621	-0.780	-0.607	-0.745	-0.563	-0.690	-0.520	-0.660	-0.507
	2	-0.809	-0.629	-0.784	-0.603	-0.741	-0.571	-0.685	-0.514	-0.661	-0.499
	3	-0.800	-0.622	-0.781	-0.604	-0.751	-0.568	-0.681	-0.511	-0.667	-0.496
	4	-0.805	-0.623	-0.778	-0.612	-0.746	-0.562	-0.687	-0.517	-0.665	-0.501
25	1	-0.794	-0.625	-0.763	-0.601	-0.735	-0.582	-0.681	-0.519	-0.646	-0.483
	2	-0.787	-0.628	-0.761	-0.605	-0.743	-0.589	-0.686	-0.520	-0.643	-0.485
	3	-0.792	-0.621	-0.765	-0.605	-0.741	-0.583	-0.684	-0.516	-0.651	-0.492
	4	-0.794	-0.629	-0.767	-0.606	-0.746	-0.586	-0.681	-0.521	-0.649	-0.487

表 3 各工作状态的尺度波动参数统计值
Tab. 3 The statistical parameter of scaling fluctuation value

工作 压力/MPa	统计 参数	排量 1		排量 2		排量 3		排量 4		排量 5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
14	均值	-0.803	-0.624	-0.781	-0.607	-0.746	-0.566	-0.686	-0.516	-0.663	-0.501
	方差	0.005	0.004	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004
25	均值	-0.792	-0.626	-0.764	-0.604	-0.741	-0.585	-0.683	-0.519	-0.647	-0.487
	方差	0.003	0.003	0.004	0.002	0.004	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004

较小且远小于其均值,说明尺度参数稳定,可作为排量标定参数。图 11~14 分别为采用尺度波动参数标定各泵送状态排量结果,可以看出采用最小、最大尺度波动参数标定排量线性度较好,相近工作排量没有出现尺度参数重叠现象,较好地地区分出相近排量。

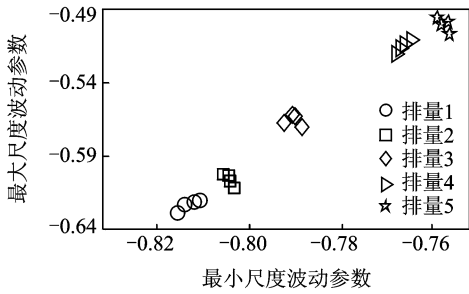


图 11 14 MPa 极值增量 DFA 法两端尺度参数

Fig. 11 Two ending scale parameters of 14 MPa with DFA increment series of extreme point

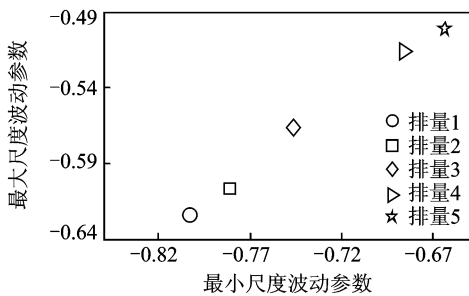


图 12 14 MPa 各排量下极值增量 DFA 法两端尺度参数均值

Fig. 12 Mean value of scale parameters of 14 MPa with DFA increment series of extreme point

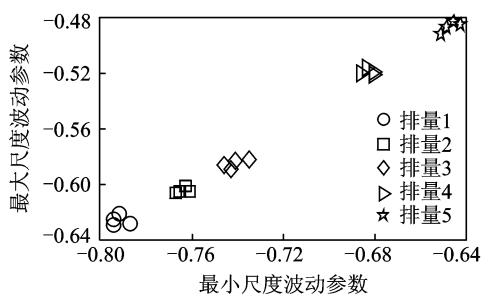


图 13 25 MPa 各排量下极值增量 DFA 法两端尺度参数

Fig. 13 Two ending scale parameters of 25 MPa with DFA increment series of extreme point

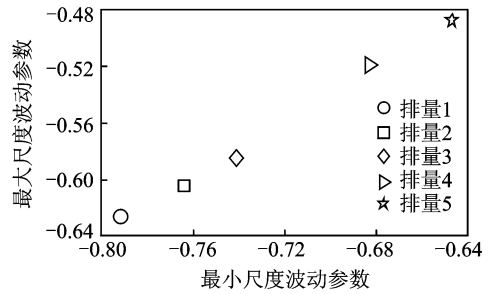


图 14 25 MPa 各排量下极值增量 DFA 法两端尺度参数均值

Fig. 14 Mean value of scale parameters of 25 MPa with DFA increment series of extreme point

为进一步说明极值增量 DFA 法的有效性,图 15 所示极值增量 DFA 法与 DFA 法标定结果对比(为便于两方法直观对比,将极值增量 DFA 法标定结果整体沿 45° 方向平移了一个单位向量,而 DFA 法的横、纵坐标为同一标度指数)。极值增量 DFA 法的排量标定范围在 0.14 左右,较 DFA 法参数范围 0.05 提高了近 3 倍。以上分析表明,极值增量 DFA 法可使排量标定精度大大提高,进而提高排量计量精度。图 16 为极值增量 DFA 法分析两泵送压力下各波动参数的均值,可看出两泵送压力下排量标定结果都具有较好的线性度且明显属于两条不同斜率的直线。这也说明极值增量 DFA 法还可标定出不同系统泵送压力。

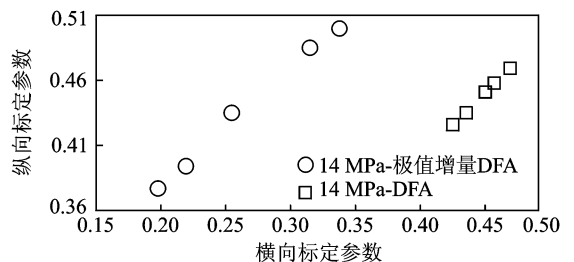


图 15 极值增量法与 DFA 法对比图

Fig. 15 Comparison between DFA and the DFA increment series of extreme point

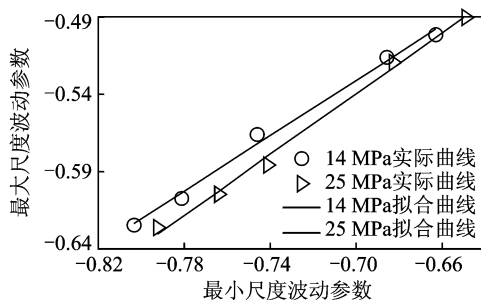


图 16 极值增量 DFA 法两不同压力效果图

Fig. 16 Result of different pressure with DFA increment series of extreme point

4 结 论

1) 试验数据分析结果表明,基于 DFA 排量检测法可用于泵车排量标定,但在泵送排量相近时易出现排量标定指数重叠现象。

2) 提出的极值增量 DFA 排量检测法使得排量标定范围较 DFA 排量检测法提高了近 3 倍,标定精度得到较大的提升为排量计量奠定了基础。

3) 极值增量 DFA 排量检测法可有效区分不同系统泵送压力,为泵车工作状态以及健康状态监测提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] 刘会勇,李伟,林勇刚,等.基于泵送压力的混凝土泵排量计量方法[J].机械工程学报,2009,45(5):166-170. Liu Huiyong, Li Wei, Lin Yonggang, et al. Measuring method of concrete pump discharge based on pumping pressure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 166-170. (in Chinese)
- [2] Uchida T. Concrete discharge indicating device of concrete pump car: Japan, 2002276157[P]. 2002-09-25.
- [3] Adachi K. Concrete discharging amount indicating device for concrete pump vehicle: Japan, 2002276542 [P]. 2002-09-25.
- [4] 张国忠.现代混凝土泵车及施工应用技术[M].北京:中国建材工业出版社,2004:109-113.
- [5] 林近山,陈前.基于多重分形去趋势波动分析的齿轮箱故障特征提取方法[J].振动与冲击,2013,32(2):97-101. Lin Jinshan, Chen Qian. Fault feature extraction of gearboxes based on multifractal detrended fluctuation analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(2):97-101. (in Chinese)
- [6] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides[J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1685-1689.
- [7] Kurnaz M. Detrended fluctuation analysis as a statisti-

cal tool to monitor the climate [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2004, 2004(7):927-936.

- [8] Jiang Zhiqiang, Chen Wei, Zhou Weixing. Detrended fluctuation analysis of intertrade durations[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2009, 388(4):433-440.
- [9] 牟松.基于去趋势波动分析的往复式泥浆泵故障诊断方法[J].齐齐哈尔大学学报,2013,29(5):88-91. Mou Song. Fault diagnosis method for reciprocating mud pump based on detrended fluctuation analysis[J]. Journal of Qiqihar University, 2013, 29(5):88-91. (in Chinese)
- [10] 秦毅,王家序,毛永芳.基于软阈值和小波模极大值重构的信号降噪[J].振动、测试与诊断,2011,31(5):543-547. Qin Yi, Wang Jiayu, Mao Yongfang. Signal denoising based on soft thresholding and reconstruction from dyadic wavelet transform modulus maxima [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(5):543-547. (in Chinese)
- [11] 季忠,黄捷,秦树人.提升小波在齿轮箱故障诊断中的应用[J].振动、测试与诊断,2010,30(3):291-294. Ji Zhong, Huang Jie, Qin Shuren. Gearbox fault diagnosis using lifting wavelet [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3):291-294. (in Chinese)
- [12] 刘密歌,李晓斌,尹月琴.基于极大似然估计的奇异点检测[J].现代电子技术,2011,34(11):82-84. Liu Minge, Li Xiaobin, Yin Yueqin. Singularity detection based on maximum likelihood estimation [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(11): 82-84. (in Chinese)
- [13] 黄晓林,宁新宝,王新龙.心跳间隔增量序列的多尺度分析及临床应用[J].科学通报,2009,54(17):2489-2494. Huang Xiaolin, Ning Xinbao, Wang Xinlong. Multi-scale analysis of heart beat interval increment series and its clinical significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(17):2489-2494. (in Chinese)
- [14] Ashkenazy Y, Havlin S, Ivanov P C, et al. Magnitude and sign scaling in power-law correlated times [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2003, 323(5):19-41.



第一作者简介:江星星,男,1989年11月生,博士生。主要研究方向为机械健康状态智能检测、信号处理。
E-mail:jiangxinlong1989@126.com

